

УДК 629.33.083:621.892.8

В. Є. ОЛШЕВСЬКА^{1*}, Г. С. ОЛШЕВСЬКИЙ², Г. П. ІВАНОВА³

^{1*}Каф. автомобільного транспорту, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (099) 36 68 845, ел. пошта olishevskav.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351

²Каф. електроенергетики, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 56 51 830, ел. пошта olishevskiy.h.s@nmu.one, ORCID 0000-0001-9576-7527

³Каф. будівництва, геотехніки та геомеханіки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (050) 45 29 945, ел. пошта ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

Дослідження інноваційних матеріалів для ремонту автомобілів

Мета. Основною метою роботи є дослідження впливу інноваційних матеріалів для ремонту автомобілів на структуру і властивості поверхонь тертя деталей й можливий механізм взаємодії матеріалів в трибосполученнях. **Методика.** В роботі використані наступні методи дослідження: теоретичні дослідження (класифікація, систематизація), аналіз та узагальнення відомих наукових результатів, емпіричні методи (порівняння, спостереження), експериментальні дослідження (металографічний аналіз, випробування на мікротвердість, зносостійкість, вимірювання шорсткості поверхні). **Результати.** Запропоновані інноваційні матеріали на основі серпентинітів. В основу розробки покладено ідеї використання матеріалів нового покоління та управління процесами, що відбуваються в зоні контакту пар тертя для підвищення зносостійкості та довговічності трибосполучень. Проведені експериментальні дослідження механізму взаємодії інноваційних матеріалів зі сталлю 40XH в умовах тертя, які показали, що твердість та зносостійкість поверхневого шару збільшуються у 3 і 4 рази, відповідно, а шорсткість контактних поверхонь зменшується у 6 разів. Компоненти інноваційних матеріалів дифундують у поверхневі шари матеріалу поверхонь тертя та утворюють металокерамічні шари, що являють собою розчини компонентів досліджених матеріалів у фазових складових сталі 40XH. Запропоновані інноваційні матеріали дозволяють не тільки знизити знос поверхонь тертя, але й відновити функціональний стан зношених поверхонь без припинення експлуатації механізмів. **Наукова новизна.** Обґрунтовано використання інноваційних матеріалів для запобігання зносу та відновлення функціонального стану поверхонь тертя деталей автомобілів. Встановлено механізм дії інноваційних матеріалів, який полягає в спрямованій іонній дифузії компонентів спеціального трибологічного складу. Досліджено механічні і експлуатаційні властивості сталі 40XH та встановлено, що підвищення твердості контактних поверхонь у поєднанні з низькою шорсткістю призводить до виникнення унікального антифрикційного ефекту. **Практична значимість.** Проведені дослідження процесів зносу та утворення зносостійких шарів в умовах дії інноваційних матеріалів дозволяють сформулювати умови обробки поверхонь тертя для зниження зносу, зміцнення поверхонь, відновлення функціонального стану зношених поверхонь без зупинки експлуатації механізмів. Розроблено технологічні прийоми внесення інноваційних матеріалів у вузли тертя, що дозволяє отримувати якісні зносостійкі шари на поверхнях пар тертя.

Ключові слова: інноваційні матеріали; пара тертя; мікроструктура; твердість; шорсткість; зносостійкість; відновлення поверхонь тертя

Вступ

Важливим завданням автомобільного транспорту є забезпечення якісного та безпечного його функціонування.

Характеристикою, яка суттєво впливає на ефективність використання автомобільного транспорту та надійність транспортних засобів, є технічний стан автомобілів [10].

В процесі роботи автомобіля показники його технічного стану змінюються від початкових,

що відповідають новому автомобілю, до гранично допустимих, а потім і до граничних значень, при яких подальше застосування за призначенням неприпустиме або недоцільне [10].

Основною причиною, що викликає зміну технічного стану, є знос деталей, вузлів, агрегатів і систем автомобіля [1, 10, 13].

В сучасних автомобілях велика кількість деталей, які працюють в умовах тертя, наприклад, деталі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). Сьогодні 99,8 % автомобільного транспорту

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

в світі працює на ДВЗ. Автори роботи [24] висловлюють думку, що, незважаючи на розвиток електромобілів і гібридів, 85...90 % транспортної енергії буде надходити від звичайного рідкого палива, яке приводить у дію ДВЗ, до 2040 року.

Значення проблеми зносу та її масштаби характеризують також наступні цифри: у типовому легковому автомобілі близько 79 % енергії витрачається на подолання тертя та втрати; витрати на подолання тертя поглинають до третини енергії, що виробляється в світі; через знос вузлів трибосполучень відбувається до 80 % механічних поломок [1, 30].

Проблеми зносу деталей, вузлів, агрегатів і систем автомобілів надзвичайно актуальні і для України. Автомобільний транспорт в Україні нараховує понад 9,2 млн транспортних засобів, у тому числі 6,9 млн легкових автомобілів, близько 250 тис. автобусів, 1,3 млн вантажних автомобілів, понад 840 тис. одиниць мототранспорту [12]. Крім того, функціонування автомобільного транспорту в Україні має свої особливості, серед яких технічна та (або) моральна застарілість майже 70 відсотків рухомого складу; середній вік парку легкових автомобілів в Україні сягає 22,7 років, що у два рази перевищує цей показник в Європейському Союзі (ЄС) – приблизно 11,5 років; кількість автомобілів, які експлуатуються понад 10 років, становить 83 % [12].

Зношування деталей, вузлів, агрегатів та систем автомобіля приводить до руйнування поверхонь сполучених деталей, порушення їх первісних геометричних форм, об'ємів, ваг [1, 8, 9, 12, 15].

Крім того, зміна технічного стану автомобілів, що відбувається в результаті тертя, призводить до зростання питомих витрат на запасні частини, технічне обслуговування та ремонт [1, 15]. У ремонтних роботах, які погано піддаються механізації та автоматизації, зайнята приблизно десята частина робочої сили високої кваліфікації.

Наведені дані демонструють значення і розміри проблеми зношування деталей і вузлів автомобілів та їх наслідки.

Сьогодні існує велика кількість способів підвищення зносостійкості деталей автомобілів, наприклад, термічна обробка, поверхневий на-

клеп, легування та ін. Проблеми зношування деталей автомобілів успішно вирішуються застосуванням мастильних матеріалів, які містять традиційні присадки (органічні фосфати, органічні сульфіди, органічні металеві сполуки та ін.) [7–9, 11, 17, 27].

Але перелічені методи впливу на процеси тертя і зменшення зношування деталей автомобілів часто є недостатньо ефективними, при високих матеріальних та енергетичних витратах.

Перспективним напрямом вирішення проблем зношування деталей автомобілів є безрозбірний сервіс (Smart self Technology) – новий напрям у технології ремонту автомобілів, який є комплексом робіт з технічного обслуговування і поточного ремонту вузлів та механізмів без проведення розбирально-складальних робіт із застосуванням нових мастильних матеріалів.

З цією метою активно досліджуються наноприсадки до мастильних матеріалів:

- на основі металів (металеві, оксидні, сульфідні тощо);
- на основі вуглецю (графен, нанотрубки, фулерен, наноалмази);
- нанокompозитні системи [18, 20, 21, 23, 29, 30].

За останні роки зросла кількість досліджень магній-силікатних сполук і природних силікатних мінералів в якості трибоприсадок.

Дослідження впливу присадок до мастильних матеріалів на поверхні тертя і трибологічні характеристики пари тертя «сталь – сталь», які проведені в роботі [26], показали, що в результаті обробки відбувається зміна структури сталі і підвищення мікротвердості. Результати підтверджують припущення про утворення керамічної (сервовітної) плівки, яка має значно більший запас пластичності порівняно з поверхнею з оксидною плівкою, що зазвичай присутня на поверхні при терті з мастильним матеріалом без присадки.

Автори роботи [25] провели дослідження мастильних матеріалів на основі нано-SiO₂. Тестування мастильних матеріалів з різною концентрацією присадок: 0,5 мас. %, 1,5 мас. %, 2,5 мас. %, 3,5 мас. % та 4,5 мас. % нано-SiO₂ показали, що мастильний матеріал з 3,5 мас. % нано-SiO₂ дозволяє зменшити втрати від зношення деталей, в середньому, на 42,43 %.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

В роботі [19] проведено дослідження трибологічних властивостей суміші нано-гідроксиду силікату магнію (MSH) та мікровуглецевих сфер (CS). Авторами доведено, що розкладання MSH є ключем до прояву синергетичного протизношувального ефекту з аморфним вуглецем (а-С). Результати показали, що протони H^+ , що вивільняються в результаті розкладання MSH, можуть ефективно перетворювати Fe_2O_3 на Fe_3O_4 на зношених поверхнях деталей.

Дослідження трибологічної поведінки нанокомпозитів MSH/MoS₂ показало, що антифрикційні характеристики і зносостійкість поверхонь тертя покращуються на 44,8 % і 41,2 %, відповідно [22]. Отримані результати автори пояснюють утворенням міцної двошарової трибоплівки, верхній шар якої містить велику кількість MoS₂, що забезпечує добрі антифрикційні властивості, тоді як сусідній шар, який складається з MSH, продуктів реакції мастильної присадки та металу, забезпечує стабільність першого шару.

У роботі [28] досліджено композити з політетрафторетиленової матрицею (PTFE) з двофазним армуванням на основі антигориту та воластоніту. Результати показали, що порівняно з додаванням моноантигориту або воластоніту, композити, отримані шляхом одночасного наповнення двох мінералів, продемонстрували чудові трибологічні властивості: середній коефіцієнт тертя та об'єм зносу композитів (10Atg + 20Wl)/PTFE зменшилися на 44,2 % та 71,4 %, відповідно, у порівнянні з чистим PTFE. Під час процесу тертя на зношених поверхнях як двофазно армованих PTFE матричних композитів, так і відповідних сталевих кульок утворилася суцільна трибоплівка, що складається переважно з SiO₂, MgSiO₃, Mg₂SiO₄, MgO, CaO, CaMg(SiO₃)₂ та CaF₂ [28]. Зменшення тертя та зносу пояснюється армуючим ефектом мінералів на PTFE матрицю, а також складними фізичними та хімічними реакціями на межі тертя, стимульованими синергетичними ефектами між двома мінералами.

Проведений огляд наукових джерел показує, що одним із перспективних шляхів вирішення проблеми зносу деталей автомобілів в умовах економічної кризи і дефіциту ресурсів є розробка нових інноваційних присадок до мастильних матеріалів, а дослідження зміни поверхонь і їх властивостей є актуальною науково-технічною задачею.

Мета

Метою роботи є дослідження впливу інноваційних матеріалів для ремонту автомобілів на структуру і властивості поверхонь тертя деталей й можливий механізм взаємодії матеріалів в трибосполученнях.

Методика

В роботі використані наступні методи дослідження: теоретичні дослідження (класифікація, систематизація), аналіз та узагальнення відомих наукових результатів, емпіричні методи (порівняння, спостереження), експериментальні дослідження (металографічний аналіз, випробування на мікротвердість, зносостійкість, вимірювання шорсткості поверхні).

Інноваційні матеріали, які досліджені в роботі, є порошками на основі природного матеріалу вітчизняного родовища, що належать до групи серпентинітів, дисперсністю 1...3 мкм.

Хімічний склад досліджених матеріалів містить велику кількість хімічних елементів – близько 32 елементів, у тому числі Mg, Si, Fe, Cu, Ni, Pb, Zn, Co, Cr, але основна вага припадає на магній, кремній та їх окисли: Mg $\approx$ 23 %, Si – у межах від 18 % до 21 %, MgO – до 38 %, SiO – до 45 %.

Дослідження впливу інноваційних матеріалів було проведено на конструкційній легованій сталі 40XH, яка широко використовується на автомобільному транспорті завдяки поєднанню високої міцності, зносостійкості та прогартованості.

Підготовка металевих зразків зі сталі 40XH включала:

- механічну обробку (шліфування, полірування);
- очищення спиртом;
- висушування.

Дослідження процесів тертя проведено на випробувальному стенді, який створено на базі машини тертя СМЦ–2, за схемою ролик – ролик: один – рухливий, інший – нерухомий.

Навантаження на зразки здійснювалося в діапазоні від 0 кг/см² до 350 кг/см².

Швидкість відносного переміщення поверхонь тертя не перевищувала 60000 мм/хв.

Частота обертання рухомого ролика складала $n = 500$ об/хв.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Температура навколишнього середовища: 20...25 °С.

Умови тертя: у мастильному середовищі з інноваційними присадками.

Концентрація присадки до мастильного матеріалу становила 0,1 % мас.

Мастильний матеріал подавався в зону тертя з резервуару ємністю 50 мл по хлорвініловій трубці з керамічним наконечником. Витрата мастильного матеріалу становила 4 краплі/хв.

Випробування проводилися п'ятигодинними циклами із зупинками через кожну годину для визначення величини зносу методом зважування.

У процесі обробки контролювали такі параметри: температуру, силу струму, тиск, величину плями контакту.

Мікроструктура, мікротвердість, шорсткість і зносостійкість поверхні зразків зі сталі 40ХН досліджено у вихідному стані і після обробки інноваційним матеріалом.

Металографічні дослідження зразків проводили за допомогою мікроскопів МІМ–9 та Neophot–2.

Для мікроструктурного аналізу зразків виготовляли шліфи згідно з методикою [3].

Полірування зразків робили за допомогою алмазної паст.

Травлення зразків проводили у стандартному травителі (4 % розчин HNO_3 в етанолі).

Вимірювання мікротвердості і товщини отриманих шарів проводили на приладі PMT-3 вдавленням алмазної чотиригранної піраміди з кутом при вершині 136°, при навантаженнях 0,49 Н і 0,98 Н, витримки під навантаженням 15 с, відповідно до вимог [2]. Дослідження виконувалися шляхом триразового повторення вимірів як по ширині шліфа, так і в глибину зміцненого шару. Відстань між точками вимірювання становила 0,25...0,50 мм.

Шорсткість поверхні вимірювалась профілометром: діапазон вимірювання глибини: до 200 мкм; точність: 0,01...0,05 мкм [5], [6].

Визначення втрати маси зразків здійснено шляхом зважування на аналітичних вагах із точністю до 10^{-4} г.

На початковому етапі було проведено зважування зразків у вихідному стані, що забезпечує базове значення маси для подальших розрахунків.

Після завершення випробувань зразки було очищено від продуктів зношування, знежирено з метою усунення впливу поверхневих забруднень на результати вимірювань.

Зважування дозволяє встановити фактичну масу зразків після експерименту: різниця між початковим та кінцевим значенням маси визначається як показник втрати маси, що характеризує інтенсивність процесів зношування.

Результати

В процесі обробки поверхонь тертя дослідженими матеріалами істотну роль відіграють силікати.

Силікати – це сполуки хімічних елементів із кремнієм, що перебувають у найвищому ступені окислення і утворюють із киснем кремній-кисневі тетраедри $[\text{SiO}_4]^{4-}$ [14].

Основним структурним елементом силікатів є група $[\text{SiO}_4]^{4-}$ з Si^{4+} у центрі з чотирма O^{2-} в вершинах тетраедра з ребрами довжиною 0,264 Å (рис. 1).

У складі інноваційних матеріалів є силікати магнію у різних формах із загальною формулою $n\text{MgO} \cdot m\text{SiO}_2$.

Залежно від концентрації кремнезему (SiO_2) розрізняють орто-, піро-, мета-, дисилікати та інші прості силікати [14].

За характером структурних мотивів, тетраедри $[\text{SiO}_4]^{4-}$ можуть з'єднуватися в комплекси різних форм: кільцеві, ланцюгові, шаруваті, каркасні та інші [14]. До ланцюгових силікатів належить енастатит, а до силікатів із шаруватою структурою відносяться силікати груп тальку, серпентиніту, каолініту.

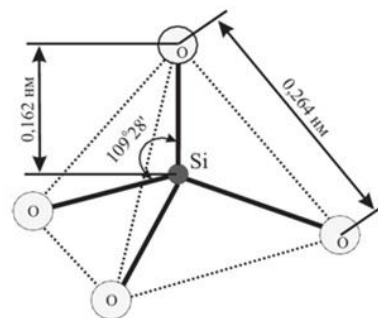


Рис. 1. Тетраедрична ортогрупа $[\text{SiO}_4]^{4-}$

Fig. 1. Tetrahedral orthogroup $[\text{SiO}_4]^{4-}$

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Природні силікати містять всі фази, які відповідають діаграмі стану системи MgO-SiO_2 , але основними фазами є форстерит та енстерит.

Форстерит $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ має ромбічну кристалічну решітку з параметрами $a = 4,770 \text{ \AA}$, $b = 10,260 \text{ \AA}$, $c = 5,990 \text{ \AA}$. Форстерит стійкий у всьому діапазоні температур, має твердість 7 одиниць за шкалою Мооса.

Енстатит $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ має структуру, що складається з нескінченних ланцюжків, і двох поліморфних форм: енстатиту і кліноенстатиту.

Важливою властивістю силікатів є їх здатність до взаємного утворення твердих розчинів та фазових перетворень.

Сьогодні велика кількість деталей автомобілів виробляється з основних конструкційних матеріалів – сталей і чавунів. У структурі сталей та чавунів, згідно з діаграмою стану Fe-C , вуглець, при будь-яких концентраціях, присутній у вигляді цементиту (Fe_3C , Ц). При вмісті вуглецю $C \leq 0,8 \%$ цементит входить до складу перліту (П), а при $C > 0,8 \%$ – цементит спостерігається у вільному вигляді.

На рис. 2 представлена кристалічна решітка цементиту [16]. Цементит має ромбічну кристалічну решітку з наступними параметрами: $a = 5,077 \text{ \AA}$, $b = 6,776 \text{ \AA}$, $c = 4,515 \text{ \AA}$.

Порівняння параметрів кристалічних решіток цементиту і форстериту (табл. 1) показало практично повний збіг параметрів по двох координатних осях. Близькість параметрів кристалічних решіток цементиту та форстериту дозволяє утворювати на поверхні сталі силікатні сполуки без суттєвого спотворення їх кристалічних решіток, що дуже важливо для проходження дифузійних процесів.

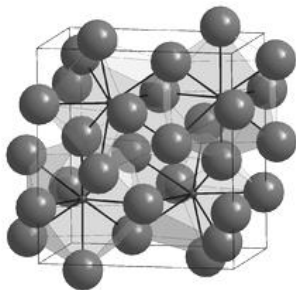


Рис. 2. Кристалічна решітка цементиту Fe_3C

Fig. 2. Crystal lattice of cementite Fe_3C

Дослідження інноваційних присадок до масляного матеріалу було проведено на конструкційній легованій сталі 40XH, яка використовується для виготовлення високоміцних відповідальних деталей, які працюють в складних умовах динамічних і ударних навантажень, тертя.

Зі сталі 40XH виготовляють осі, вали, шатуни, зубчасті колеса, муфти, вали-шестірні, шпинделі, болти, важелі, штоки, циліндри та інші відповідальні навантажені деталі.

Таблиця 1

Параметри кристалічних решіток цементиту та форстериту

Table 1

Crystal lattice parameters of cementite and forsterite

	Параметр, $\text{\AA}$		
Форстерит	$a = 4,770$	$b = 10,260$	$c = 5,990$
Цементит	$c = 4,515$	$2a = 10,154$	$b = 6,726$
Різниця параметрів, $\text{\AA}$	0,255	0,106	0,736
Різниця параметрів, %	5,3	1,0	10,9

Хімічний склад сталі 40XH наведено в табл. 2 [4].

Таблиця 2

Хімічний склад сталі 40XH

Table 2

Chemical composition of 40XH steel

Вуглець	0,36...0,44
Кремній	0,17...0,37
Марганець	0,50...0,80
Хром	0,45...0,75
Нікель	1,00...1,40

Вихідна структура сталі 40XH – структура після нормалізації – представлена зернами фериту та дрібнопластинчастого перліту.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Під час випробування, частинки матеріалу присадки потрапляють зі змащенням у зону тертя і піддаються впливу контактного тиску. В результаті цього відбувається процес руйнування деяких кристалів присадки і утворення активних радикалів. Одночасно з цим, кристали присадки, які мають більш високу твердість, роблять мікрошліфування поверхонь тертя та видалення окисних плівок. Таким чином, відбувається підготовка контактуючих поверхонь до самого процесу обробки мастильним матеріалом з присадкою, зменшення шорсткості поверхні та її активація.

Під дією контактних навантажень відбувається заміщення катіонів Mg^{2+} в кристалах присадки на катіони Fe^{2+} з утворенням твердих розчинів. Внаслідок цього на поверхні тертя утворюється шар металокераміки, що міцно пов'язаний з поверхнею деталі (рис. 3). Здатність силікатів до утворення взаємних твердих розчинів призводить до того, що металокерамічний шар на поверхні тертя складається з різних за структурою сполук (від нескінченних шарів і ланцюжків до аморфної фази), які пов'язані між собою і здатні до подальших фазових перетворень.

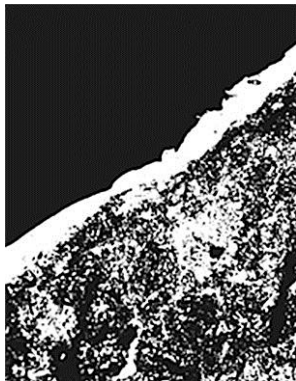


Рис. 3. Структура сталі 40ХН після тертя в умовах мастильного матеріалу з використанням присадки, х 400

Fig. 3. Structure of steel 40XH after friction in a lubricant with the use of an additive, x 400

Дослідження після обробки мастильним матеріалом з присадкою показало, що компоненти присадки дифундують у поверхні шари сталі і утворюють специфічні тверді розчини і хімічні сполуки, глибина проникнення яких становить 0,1...0,2 мм.

Цей процес триває доти, доки вся поверхня металу не буде насичена матеріалом присадки. Завершення процесу насичення поверхні тертя матеріалом присадки супроводжується різким зниженням коефіцієнта тертя та температури вузла тертя.

У підповерхневих шарах сталі 40ХН спостерігається подрібнення цементитних пластин у перліті.

Таким чином, процеси, що відбуваються в зоні тертя при обробці мастильним матеріалом з дослідженими присадками, можна розділити на чотири етапи:

- 1 – активація поверхні;
- 2 – адсорбція матеріалу присадки поверхневими шарами сталі 40ХН;
- 3 – дифузія матеріалу присадки з поверхневого шару углиб металу;
- 4 – відновлення поверхонь тертя зі зменшенням шорсткості.

Вимірювання мікротвердості проводили на приладі ПМТ–3 (рис. 4).



Рис. 4. Мікроструктура поверхневих шарів з відбитками алмазної піраміди, х 300

Fig. 4. Microstructure of surface layers with diamond pyramid indenter, x 300

В табл. 3 представлено результати дослідження шорсткості, механічних і експлуатаційних властивостей контактуючих поверхонь: мікротвердості, зносостійкості.

Дослідження мікротвердості оброблених поверхонь тертя дозволило встановити певну залежність. Мікротвердість поверхневого шару, що виявляється на мікрошліфі у вигляді світлої смуги (рис. 3), відрізняється від вихідної твердості сталі 40ХН, і, як правило, значно перевищує її (рис. 5). На глибині порядку 0,2 мм і більше мікротвердість порівнюється з вихідною мікротвердістю сталі 40ХН. Максимальне підвищення мікротвердості знаходиться на глибині до 0,04 мм від поверхні тертя.

Таблиця 3

Властивості поверхневих шарів сталі 40XH

Table 3

Properties of the surface layers of steel 40XH

Сталь 40XH	Механічні і експлуатаційні властивості		
	мікротвердість, HV	шорсткість R_a , мкм	зносостійкість
вихідний стан	200	1,25	$1,5 \cdot 10^{-11}$
стан після обробки	585	0,2	$0,4 \cdot 10^{-11}$

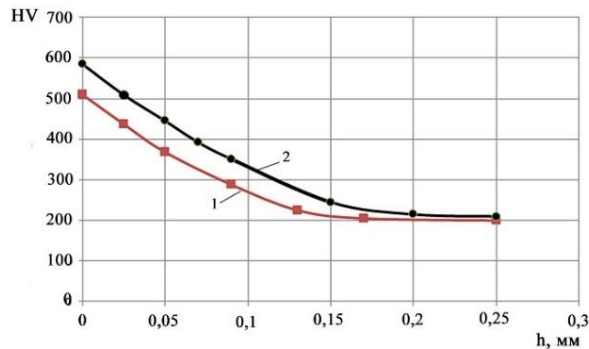


Рис. 5. Залежність мікротвердості сталі 40XH від глибини шару:

1 – обробка з присадкою 1; 2 – обробка з присадкою 2

Fig. 5. Dependence of microhardness of 40XH steel on layer depth:

1 – treatment with additive 1; 2 – treatment with additive 2

Проведені випробування поверхонь тертя, що оброблені мастильними матеріалами з присадками, показали збільшення твердості поверхневих шарів у 3 рази, зменшення шорсткості контактуючих поверхонь у 6 разів, підвищення зносостійкості у 4 рази. Підвищення твердості контактних поверхонь в поєднанні з низькою шорсткістю призвело до виникнення унікального антифрикційного ефекту.

На основі проведених досліджень розроблені технологічні прийоми внесення інноваційних матеріалів (присадок) у вузли тертя, які дозволяють не тільки значно знизити зношування, але й відновити функціональний стан зношених поверхонь деталей.

Наукова новизна та практична значимість

Обґрунтовано використання інноваційних матеріалів для запобігання зносу та відновлення функціонального стану поверхонь тертя деталей автомобілів.

Встановлено механізм дії інноваційних матеріалів, який полягає в спрямованій іонній дифузії компонентів спеціального трибологічного складу.

Досліджено механічні і експлуатаційні властивості сталі 40XH та встановлено, що підвищення твердості контактних поверхонь у поєднанні з низькою шорсткістю призводить до виникнення унікального антифрикційного ефекту.

Проведені дослідження процесів зносу та утворення зносостійких шарів в умовах дії інноваційних матеріалів дозволяють сформулювати умови обробки поверхонь тертя для зниження зносу, зміцнення поверхонь, відновлення функціонального стану зношених поверхонь без зупинки експлуатації механізмів.

Розроблено технологічні прийоми внесення інноваційних матеріалів у вузли тертя, що дозволяють отримувати якісні зносостійкі шари на поверхнях пар тертя.

Висновки

В роботі запропоновані інноваційні матеріали на основі серпентинітів до мастильних матеріалів. В основу розробки покладено ідеї використання матеріалів нового покоління та управління процесами, що відбуваються в зоні контакту пар тертя для підвищення зносостійкості та довговічності трибосполучень.

Проведені експериментальні дослідження механізму взаємодії інноваційних матеріалів зі сталлю 40XH в умовах тертя, які включають аналіз хімічного складу порошкових матеріалів, металографічні дослідження поверхонь тертя та зміни їх механічних і експлуатаційних властивостей.

Можливий механізм дії інноваційних матеріалів у трибосполученнях полягає в спрямованій іонній дифузії компонентів спеціального трибологічного складу. Компоненти інноваційних матеріалів дифундують у поверхневі шари матеріалу поверхонь тертя та утворюють металокера-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

мічні шари, що являють собою розчини компонентів досліджених матеріалів у фазових складових сталі 40ХН.

Дослідження механічних і експлуатаційних властивостей поверхонь тертя показали, що твердість та зносостійкість поверхневого шару збільшуються у 3 і 4 рази відповідно, а шорсткість контактних поверхонь зменшується у 6 разів. Підвищення твердості контактних поверхонь у поєднанні з низькою шорсткістю призвело до виникнення унікального антифрикційного ефекту.

Проведені дослідження процесів зносу та утворення зносостійких шарів в умовах дії інноваційних матеріалів дозволяють сформулювати

умови обробки поверхонь тертя для зниження зносу, зміцнення поверхонь, відновлення функціонального стану зношених поверхонь без зупинки експлуатації механізмів.

Розроблено технологічні прийоми внесення інноваційних матеріалів у вузли тертя, що дозволяють отримувати якісні зносостійкі шари на поверхні пар тертя.

Запропоновані інноваційні матеріали дозволяють не тільки знизити знос поверхонь тертя, а також відновити функціональний стан зношених поверхонь без припинення експлуатації механізмів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. *ДСТУ ISO 6507-1:2007. Матеріали металеві. Визначення твердості за Вікерсом. Частина 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2005, IDT)*. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2009.
3. *ДСТУ 7175:2010. Метали і сплави. Методи металографічного контролювання. Терміни та визначення понять*. [Чинний від 2010-12-09]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 26 с.
4. *ДСТУ 7806:2015. Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови*. [Чинний від 2016-04-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 50 с.
5. *ДСТУ ISO 4288-2001. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Правила і процедури оцінювання структури поверхні (ISO 4288:1996, IDT)*. [Чинний від 2003-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2003. 14 с.
6. *ДСТУ ISO 4287:2012. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури (ISO 4287:1997, IDT+ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT+ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT). 3 поправками*. [Чинний від 2013-03-01]. Вид. офіц. Київ : Мінекономрозвитку України, 2013.
7. 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 імені Івана Пулюя, 2016. 33 с.
URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18165/1/mater.pdf>
8. Муращенко А. М., Яхно О. М. *Основи теорії змащування: практичні та лабораторні роботи* : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 112 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/05a07668-a4fb-4aa2-b85c-b4365c139ec4>
9. Наглюк М. І. *Конспект лекцій з дисципліни «Експлуатаційні матеріали» : для бакалаврів спец. 274 «Автомобільний транспорт»*. Харків : ХНАДУ, 2023. 202 с.
URL: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/17650>
10. 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>
11. Олішевська В. Є., Бондарчук Т. О. Застосування присадок в автомобільних мастильних матеріалах. *Тиждень студентської науки 2023*. Матеріали 78-ї студ. наук.-техн. конф. (Дніпро, 24-28 квіт. 2023 р.) Дніпро, 2023. С. 150–152. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/163735>

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

12. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С. Обґрунтування раціонального рухомого складу підприємства в умовах переходу до електромобілів. *Автошляховик України*. 2024. № 2. С. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2024-2-279-35-44>
13. Олішевська В. Є., Олішевський Г. С., Іванова Г. П. Металеві конструкційні матеріали для виробництва і ремонту деталей автомобілів: практика та перспективи. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 3(111). С. 111–129. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/341197>
14. Племянніков М. М., Тобілко В. Ю. *Силікатне матеріалознавство* : навч. посіб. для здобувачів ступеня доктора філософії 161 «Хімічні технології та інженерія». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 103 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6917f3d1-ac80-4c19-a3c9-791682a40f3e/content>
15. Про затвердження «Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту» : Наказ М-ва трансп. України від 30.03.1998 № 102. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98#Text>
16. Прокопович І. В. *Металознавство* : навч. посіб. Одеса : Екологія, 2020. 308 с.
17. Пушка О. С., Войтік А. В. *Конспект лекцій з дисципліни «Паливно-мастильні та інші експлуатаційні матеріали»*. Для студентів спеціальності 208 «Агроінженерія». Умань : Уманський НУС, 2020. 101 с. URL: <https://pmoapv.udau.edu.ua/assets/files/2021/lekicii/pmm-lz.pdf>
18. Cai X., Li S., Zeng W., Huang K., Zhao L., Zeng D., Tu X. Improving dispersion and tribological performance of MoS₂ lubricant additive with the synergistic effects of MSH and amorphous carbon. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 29. P. 2509–2519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.003>
19. Gao R., Chang Q., Lichun H., He Y. Nano Magnesium Silicate Hydroxide as Synergistic Lubricant Additive With Micro Carbon Sphere for Enhanced Tribological Properties. *Journal of Tribology*. 2024. Vol. 146, Iss. 3. 031702. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4063702>
20. Ghaednia H., Hossain M. S., Jackson R. Tribological Performance of Silver Nanoparticle–Enhanced Polyethylene Glycol Lubricants. *Tribol Transaction*. 2016. Vol. 59, Iss. 4. P. 585–592. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1092623>
21. 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. Vol. 25. 103628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103628>
22. Guan Z., Wu Z., Liu J., Tu X., Li S. Controllable fabrication of magnesium silicate hydroxide reinforced MoS₂ hybrid nanomaterials as effective lubricant additives in PAO. *Applied Surface Science*. 2022. Vol. 597. 153777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153777>
23. 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. Vol. 407. 125261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125261>
24. Leach F., Kalghatgi G., Stone R., Miles P. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*. 2020. Vol. 1. 100005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005>
25. Lue Y.-F., Hsiao W.-L., Chen Y.-S. Tribology Performance of Silica Nanoparticles as Lubricant Additives in a Reciprocating Four-Stroke Engine Motorcycle. *International Journal of Automotive Technology*. 2023. Vol. 24, Iss. 2. P. 435–444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0036-3>
26. Lyubchenko O., Gapochenko S. Modification of frictional surfaces of bearings by addition of nanoparticle compositions to lubricants. *Bulletin of the National Technical University «KhPI»*. Ser. : *New solutions in modern technology*. 2024. № 3(21). P. 3–9. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.03.01>
27. Olishavska V. E., Isakova M. L., Stashevska I. Features of molybdenum disulfide friction. *Widening our Horizons*. Proceedings of the 16th International Forum for Students and Young Researchers. (Dnipro, 21-22 April 2021 p.). Dnipro, 2021. P. 236–239. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160283>
28. Wang C., Yu H., Yin Y., Zhou X., Wang H., Song Z., Wang S., Yang Z., Bai Z. Preparation and Tribological Behaviors of Antigorite and Wollastonite Mineral Dual-Phase-Reinforced Polytetrafluoroethylene Matrix Composites. *Lubricants*. 2024. Vol. 12, Iss. 3. P. 74. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12030074>
29. 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. Vol. 146. 106228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106228>
30. Zhao J., Huang Y., He Y., Shi Y. Nanolubricant additives: A review. *Friction*. 2021. Vol. 9, Iss. 5. P. 891–917. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0450-8>

V. E. OLISHEVSKA^{1*}, H. S. OLISHEVSKYI², H. P. IVANOVA³

^{1*}Dep. of Motor Vehicle Transport, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (099) 36 68 845, e-mail olishevska.v.ye@nmu.one, ORCID 0000-0002-3098-1351

²Dep. of Electric Power Engineering, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 56 51 830, e-mail Olishevskiyi.H.S@nmu.one, ORCID 0000-0001-9576-7527

³Dep. of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, Yavornytskoho Ave., 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050) 45 29 945, e-mail ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

Research on Innovative Materials for Automobile Repair

Purpose. The main purpose of the work is to study the influence of innovative materials for car repair on the structure and properties of friction surfaces of parts and the possible mechanism of interaction of materials in tribological pairs. **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), experimental research (metallographic analysis, microhardness testing, wear resistance testing, surface roughness measurement). **Findings.** Innovative materials based on serpentinites are proposed. The development is based on the ideas of using new-generation materials and controlling the processes occurring in the contact zone of friction pairs to increase the wear resistance and durability of tribological combinations. Experimental studies of the mechanism of interaction of innovative materials with 40XH steel under friction conditions have shown that the hardness and wear resistance of the surface layer increase by 3 and 4 times, respectively, and the roughness of the contact surfaces decreases by 6 times. The components of innovative materials diffuse into the surface layers of friction surfaces and form metal-ceramic layers, which are solutions of the components of the studied materials in the phase components of 40XH steel. The proposed innovative materials not only reduce the wear of friction surfaces, but also restore the functional condition of worn surfaces without interrupting the operation of mechanisms. **Originality.** The use of innovative materials to prevent wear and restore the functional condition of friction surfaces of automotive parts has been substantiated. The mechanism of action of innovative materials has been established, which consists in the directed ion diffusion of components of a special tribological composition. The mechanical and operational properties of 40XH steel have been studied, and it has been established that an increase in the hardness of contact surfaces in combination with low roughness leads to a unique anti-friction effect. **Practical value.** Studies of wear processes and the formation of wear-resistant layers under the influence of innovative materials allow us to formulate conditions for treating friction surfaces to reduce wear, strengthen surfaces, and restore the functional state of worn surfaces without stopping the operation of mechanisms. Technological methods for introducing innovative materials into friction units have been developed, allowing high-quality wear-resistant layers to be obtained on friction pair surfaces.

Keywords: innovative materials; friction pair; microstructure; hardness; roughness; wear resistance; restoration of friction surfaces

REFERENCES

1. Hevko, I. B., Rohatynskiy, R. M., Liashuk, O. L., Hud, V. Z., Levkovych, M. H., Stashkiv, M. Ya., & Sipravska, M. D. (2021). *Osnovy tekhnolohii vyrobnytstva i remontu avtomobiliv*. Ternopil, Ukraine: TNTU imeni Ivana Puliuiia. (in Ukrainian)
2. *Materialy metalievi. Vyznachennia tverdosti za Vikhersom. Chastyna 1. Metod vyprovuvannia, DSTU ISO 6507-1:2007*. (2009). (in Ukrainian)
3. *Metaly i splavy. Metody metalohrafichnoho kontroliuvannia. Terminy ta vyznachennia poniat, 26 DSTU 7175:2010*. (2010). (in Ukrainian)
4. *Prokat iz lehovanoi konstruktsiinoi stali. Tekhnichni umovy, 50 DSTU 7806:2015*. (2016). (in Ukrainian)
5. *Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Pravyla i protsedury otsiniuvannia struktury poverkhni, 14 DSTU ISO 4288:2001*. (2003). (in Ukrainian)
6. *Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Terminy, vyznachennia poniat i parametry struktury, DSTU ISO 4287:2012*. (2013). (in Ukrainian)
7. Klendii, V. M., Liashuk, O. L., & Hupka, A. B. (2016). *Kurs leksii z dysypliny «Ekspluatatsiini materialy» dlia studentiv dennoi ta zaochnoi form navchannia za napriamom 6.070106 «Avtomobilnyi transport»*. Ternopil, Ukraine: TNTU imeni Ivana Puliuiia. Retrieved from <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18165/1/mater.pdf> (in Ukrainian).

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

8. Murashchenko, A. M. & Yakhno, O. M. (2024). *Osnovy teorii z mashchuvannia: praktychni ta laboratorni roboty*. Kyiv, Ukraine: KPI im. Ihoria Sikorskoho. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/items/05a07668-a4fb-4aa2-b85c-b4365c139ec4> (in Ukrainian)
9. Nahliuk, M. I. (2023). *Konspekt lektsii z dystsypliny «Ekspluatatsiini materialy»: dlia bakalavriv spets. 274 «Avtomobilnyi transport»*. Kharkiv, Ukraine: KhNADU. Retrieved from <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/17650> (in Ukrainian).
10. Olishevska, V. E., Bas, K. M., & Krivda, V. V. (2025). *Osnovy tekhnolohii vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv. Praktykum*. Dnipro, Ukraine: NTU «DP». Retrieved from <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/170985> (in Ukrainian)
11. Olishevska, V. E. & Bondarchuk, T. O. (2023, April). Zastosuvannia prysadok v avtomobilnykh mastylnykh materialakh. In *Tyzhden studentskoi nauky 2023. Materialy 78 studentskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* (pp. 150-152). Dnipro, Ukraine. Retrieved from: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/163735> (in Ukrainian).
12. Olishevska, V. E., & Olishevskiy, H. S. (2024). Substantiating rational rolling stock at an enterprise in the transition to electric vehicles. *Avtoshliakhovyk Ukrayiny*, 2, 35-44. DOI: <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2024-2-279-35-44> (in Ukrainian)
13. Olishevska, V. E., Olishevskiy, H. S. & Ivanova, H. P. (2025). Metal Structural Materials for the Production and Repair of Automobile Parts: Practice and Prospects. *Science and Transport Progress*, 3(111), 111-129. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/341197> (in Ukrainian).
14. Plemiannikov, M. M. & Tobilko, V. Yu. (2021). *Silikatne materialoznavstvo*. Kyiv, Ukraine: KPI im. Ihoria Sikorskoho. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6917f3d1-ac80-4c19-a3c9-791682a40f3e/content> (in Ukrainian)
15. Ministerstvo transportu Ukrainy. (1998). Pro zatverdzhennia «Polozhennia pro tekhnichne obsluhovuvannia i remont dorozhnikh transportnykh zasobiv avtomobilnoho transportu». Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98#Text> (in Ukrainian)
16. Prokopovych, I. V. (2020). *Metaloznavstvo*. Odesa, Ukraine: Ekolohiia (in Ukrainian)
17. Pushka, O. S. & Voitik, A. V. (2020). *Konspekt lektsii z dystsypliny «Palyvno-mastylni ta inshi ekspluatatsiini materialy»*. Uman, Ukraine: Umanskyi NUS. Retrieved from <https://pmoapv.udau.edu.ua/assets/files/2021/lekcii/pmm-lz.pdf> (in Ukrainian)
18. Cai, X., Li, S., Zeng, W., Huang, K., Zhao, L., Zeng, D. & Tu, X. (2024). Improving dispersion and tribological performance of MoS₂ lubricant additive with the synergistic effects of MSH and amorphous carbon. *Journal of Materials Research and Technology*, 29, 2509-2519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.003> (in English)
19. Gao, R., Chang, Q., Lichun, H. & He, Y. (2024). Nano magnesium silicate hydroxide as synergistic lubricant additive with micro carbon sphere for enhanced tribological properties. *Journal of Tribology*, 146(3), 031702. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4063702> (in English)
20. Ghaednia, H., Hossain, M. S. & Jackson, R. (2016). Tribological performance of silver nanoparticle-enhanced polyethylene glycol lubricants. *Tribology Transactions*, 59(4), 585-592. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2015.1092623> (in English)
21. 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> (in English)
22. Guan, Z., Wu, Z., Liu, J., Tu, X. & Li, S. (2022). Controllable fabrication of magnesium silicate hydroxide reinforced MoS₂ hybrid nanomaterials as effective lubricant additives in PAO. *Applied Surface Science*, 597, 153777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153777> (in English)
23. 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> (in English)
24. Leach, F., Kalghatgi, G., Stone, R., & Miles, P. (2020). The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*, 1, 100005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005> (in English)
25. Lue, Y.-F., Hsiao, W.-L. & Chen, Y.-S. (2023). Tribology performance of silica nanoparticles as lubricant additives in a reciprocating four-stroke engine motorcycle. *International Journal of Automotive Technology*, 24(2), 435-444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0036-3> (in English)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

26. Lyubchenko, O. & Gapochenko, S. (2024). Modification of frictional surfaces of bearings by addition of nano-particle compositions to lubricants. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : New solutions in modern technology*, 3(21), 3-9. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.03.01> (in English)
27. Olishevskaya, V. E., Isakova, M. L. & Stashevskaya, I. (2021, April). Features of molybdenum disulfide friction. In *Widening our Horizons. Proceedings of the 16th International Forum for Students and Young Researchers* (pp. 236-239). Dnipro, Ukraine. Retrieved from <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160283> (in English)
28. Wang, C., Yu, H., Yin, Y., Zhou, X., Wang, H., Song, Z., Wang, S., Yang, Z. & Bai, Z. (2024). Preparation and tribological behaviors of antigorite and wollastonite mineral dual-phase-reinforced polytetrafluoroethylene matrix composites. *Lubricants*, 12(3), 74. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12030074> (in English)
29. 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> (in English)
30. Zhao, J., Huang, Y., He, Y., & Shi, Y. (2021). Nanolubricant additives: A review. *Friction*, 9(5), 891-917. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0450-8> (in English)

Надійшла до редколегії: 21.08.2025

Прийнята до друку: 24.12.2025