

**Валерій Косарчук^{1*}, Микола Чаусов², Володимир Твердомед³, Андрій Пилипенко⁴,
Олександр Агарков⁵**

¹ Професор, Кафедра теоретичної та прикладної механіки, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2703-3542>

² Професор, Кафедра механіки, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6790-6216>

³ Доцент, Кафедра залізничної колії та колійного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0695-1304>

⁴ Доцент, Кафедра механіки, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3154-8306>

⁵ Доцент, Кафедра теоретичної та прикладної механіки, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2703-3542>

* Автор, відповідальний за листування: kosarcuk_vv@gsuite.duit.edu.ua

МАСТИЛЬНА КОМПОЗИЦІЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ПАР ТЕРТЯ

Запропоновано спосіб виготовлення мастильної композиції, яка дозволяє суттєво зменшити зношування рейок залізничної колії та коліс рухомого складу у процесі напрацювання, запобігає електрохімічній корозії металу пар тертя «колесо – рейка», а також стабілізує величину коефіцієнта тертя на оптимальному рівні через досить короткий час напрацювання.

Експериментальні дослідження зносостійкості проведені на парі тертя «зразок матеріалу бандажу залізничного колеса – зразок матеріалу залізничної рейки» при співвідношенні твердості матеріалу бандажу (твердість за Роквеллом, шкала HRC-35,3) до твердості матеріалу рейки 1,1. Результати випробувань свідчать, що у випадку використання мастильної композиції «промислове мастило марки Bio Rail з добавкою наноматеріалу рейки» зношування зразка із металу рейки після трьох годин напрацювання практично не спостерігалось. Причому середнє значення коефіцієнта тертя протягом трьох годин напрацювання підтримувалось на рівні 0,25, що є оптимальним для пари тертя «колесо – рейка».

Ключові слова: мастильна композиція, зносостійкість, залізничні рейки, колеса рухомого складу, наноматеріал.

Вступ. Створення і впровадження ресурсозберігаючих технологій є однією із найважливіших актуальних проблем сучасного машинобудування. Стосовно залізничного транспорту важливою задачею є пошук способів підвищення зносостійкості гребенів бандажів коліс рухомого складу й бічних граней рейок у кривих ділянках колії.

Процес зношування вказаних елементів є досить складним і інтенсивність його залежить не тільки від характеру механічної взаємодії колеса із рейкою, який визначається формою контактуючих деталей, механічними властивостями матеріалів контактуючих деталей, швидкістю руху, особливостями будови залізничної колії та конструкції візків рухомого складу тощо. На цей процес впливає і низка інших факторів, які часом досить важко формалізувати – наявність вологи, пилу, мастильних плям, локальних геометричних нерівностей рейок і бандажів коліс тощо. Тому можливості теоретичного вирішення даної проблеми, скажімо, шляхом

математичного моделювання контактної взаємодії рейок з колесами, є досить обмеженими. До того ж зміна конструкції колії й рухомого складу потребує досить великих капітальних вкладень і часу, тому на сьогодні пріоритетним напрямком вирішення проблеми підвищення зносостійкості є лубрикація рейок і коліс [1]. Оскільки вказані пари тертя є парами відкритого типу, то мастильні матеріали, які використовуються для їхнього змащування повинні відповідати певним вимогам, із яких основними є: висока ефективність змащування поверхні контакту у досить широкому діапазоні кліматичних температур, простота нанесення і здатність утримуватись у зоні тертя протягом певного часу, високий опір контактним навантаженням, запобігання корозії металу, забезпечення оптимального значення величини коефіцієнту тертя і його стабільності у процесі напрацювання, пожегобезпечність і мінімальний вплив на довкілля, доступність і помірна вартість.

Мастильні композиції, які наразі використовуються в Україні й світі, не відповідають повною мірою наведеним вимогам. Тому розробці нових мастильних матеріалів для підвищення зносостійкості важконавантажених пар тертя приділяється велика увага.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Протягом багатьох років зусилля науковців спрямовані на встановлення закономірностей фізичних явищ, що протікають у поверхневих шарах металевих пар тертя. За умов тертя у поверхневих шарах матеріалів контактуючих деталей виникають і переміщуються дислокації, створюються і самоорганізуються нові структури, що пов'язані із подрібненням кристалітів та зміною орієнтації зерен відповідно до напрямків дії сил, виникають певні текстури, змінюються величини характеристик механічних властивостей структурних складових на усіх рівнях – від мікро- до макро- [2, 3]. Ці процеси суттєво залежать від сумісності матеріалів пари тертя. Внесення у зону тертя мастильних матеріалів може радикально змінити характер і інтенсивність вказаних процесів, завдяки чому з'являється можливість певною мірою управляти їх протіканням використовуючи мастила різного хімічного складу, консистенції, різноманітні присадки до мастил тощо.

Найбільші очікування, у даному напрямі, пов'язані із використанням як присадки наноматеріалів і нанофункціональних присадок із високою дисперсністю (10 ... 200 нм) і розвиненою питомою поверхнею (до 600 м² / г). Численні наукові дослідження показують, що ультрадисперсні матеріали, які складаються з надмалих морфологічних елементів – кристалів, зерен, пор, дисперсних включень, що знаходяться у термодинамічно нерівноважному стані, мають унікальні фізичні властивості, які недосяжні для традиційних матеріалів. Зокрема механічні властивості нанорозмірних порошоків сильно відрізняються від властивостей масивних матеріалів аналогічного хімічного складу. Внаслідок відсутності протяжних дефектів структури (дислокацій, мікротріщин, мікрокаверн) висока твердість наноматеріалів зазвичай поєднується з високою пластичністю [4, 5].

Наразі виділяють чотири основних механізми впливу наноматеріалів на зношування пар тертя із металевих матеріалів [6, 7]. Перший пов'язаний із виникненням на дефектах поверхонь тертя активних центрів зародження і розвитку специфічних нанокристалічних структур у вигляді мікропокриття, причому цей процес контролюється енергією, що виділяється під час тертя [8]. У результаті на поверхні контакту виникає так звана сервовитна плівка, яка складається переважно з ультрадисперсних частинок матеріалу. Сама сервовитна плівка є досить пористою, тому у порах затримується мастильний матеріал. Контактні поверхні деталей мають певний рельєф і дійсний контакт відбувається на порівняно невеликій площі навіть за умови деформації поверхневих шарів. Сервовитна плівка збільшує у десятки разів фактичну площу контакту деталей і значно зменшує рівень контактних напружень. Така плівка захищає поверхні тертя від зношування і за певних умов реалізує механізм вибіркового переносу частинок металу із шару мастила на поверхні тертя деталей [8], тим самим підвищує їх довговічність за рахунок так званого ремонтно-відновлювального ефекту. У випадку сталевих деталей така плівка може утворюватись при використанні мастильних матеріалів, молекули яких включають приєднані атоми металів із невисокою твердістю – міді,

олова, свинцю, цинку, алюмінію, срібла, золота й ін. Тому для внесення металевих наноматеріалів у мастильну композицію часто використовують солі жирних кислот або комплексні сполуки полівалентних металів [9].

Проте увагу дослідників привертають й інші, технологічно простіші та часто дешевші способи створення металовмісних присадок до мастил, а саме безпосереднє використання у якості добавок металевих нанопорошків різної дисперсності. Причому використовуються не тільки нанопорошки згаданих м'яких металів, але й сполук хрому, нікелю, заліза, кобальту та ін., надпластичних сплавів типу Bi-PbSn, Pb-Sn, Zn-Sn, Pb-SbSn, а також неметалевих матеріалів природного або штучного походження (графіт, алмаз, силікати та ін.) [10 – 16]. На теперішній час розроблено досить багато технологій промислового виготовлення таких порошків, серед яких найбільше поширеними є газофазний синтез, електричний вибух провідників, катодне розпилення, механічне та ультразвукове диспергування [17 – 19]. В залежності від вибраної технології та особливостей устаткування розміри частинок матеріалу можуть відрізнятися у десятки разів, крім того твердість таких частинок може перевищувати твердість матеріалів пари тертя. Все це суттєво впливає на перебіг процесів у зоні контакту деталей.

Ще один механізм підвищення зносостійкості (перекочування по твердим частинкам) досить рідко реалізується у чистому вигляді. Він проявляється у тих випадках, коли твердість частинок порошку приблизно дорівнює твердості поверхонь тертя, а їхній об'ємний вміст у змащувальній композиції високий.

Інші два механізми впливу (зрізання виступів та заповнення впадин) пов'язані з наявністю відносно твердих нанорозмірних частинок у зоні контакту. У цьому випадку суцільна сервовітна плівка не створюється, а тверді частинки сприяють інтенсифікації процесів пластичного деформування нерівностей на поверхнях тертя, що призводить до виникнення дрібнодисперсної (субзеренної) структури у поверхневих шарах деталі. Частинки порошку сильно деформуються, подрібнюються і також стають елементами субзеренної структури [20, 21]. Частина їх заповнює мікрокаверни на поверхнях тертя, за рахунок чого загальна шорсткість поверхонь зменшується. Така структура забезпечує підвищені характеристики міцності матеріалу, включаючи твердість, опір руйнуванню і тріщиностійкість, за рахунок чого і підвищується зносостійкість пар тертя. Звісно, що перебіг цих процесів залежить від сумісності матеріалів пар тертя, мастил і нанопорошків, що використовуються у якості присадок. Тому для встановлення загальних закономірностей цих фізичних явищ потрібно проводити подальші дослідження.

У даній роботі розглянуто результати експериментальних досліджень зносостійкості рейкової сталі за умов сухого тертя та тертя із змащуванням промисловим мастилом, а також запропонованою мастильною композицією на його основі.

Матеріали та методи дослідження. Для проведення експериментів на тертя використовували серійну випробувальну установку 2070 СМТ-1 із додатковим обладнанням для автоматичної фіксації моменту і сили тертя, температури у зоні контакту та зношування зразків (аналого-цифровий модуль «Triton 2402U»), а також для автоматизованої обробки експериментальних даних (програмний комплекс «T2402 Reader»).

Експериментальні зразки (рис. 1) виготовляли із рейкової сталі марки К74, що мала такий хімічний склад за основними компонентами: вуглець – 0,67%, кремній – 0,32%, марганець – 0,94%, залізо – основа. Для виготовлення контр тіла використовували середнє вуглецеву колісну сталь 2 [22].

Експерименти проводили за таких умов: частота обертання – 300 об/хв., сила нормального тиску – 555 Н, час безперервної роботи – 3 год.

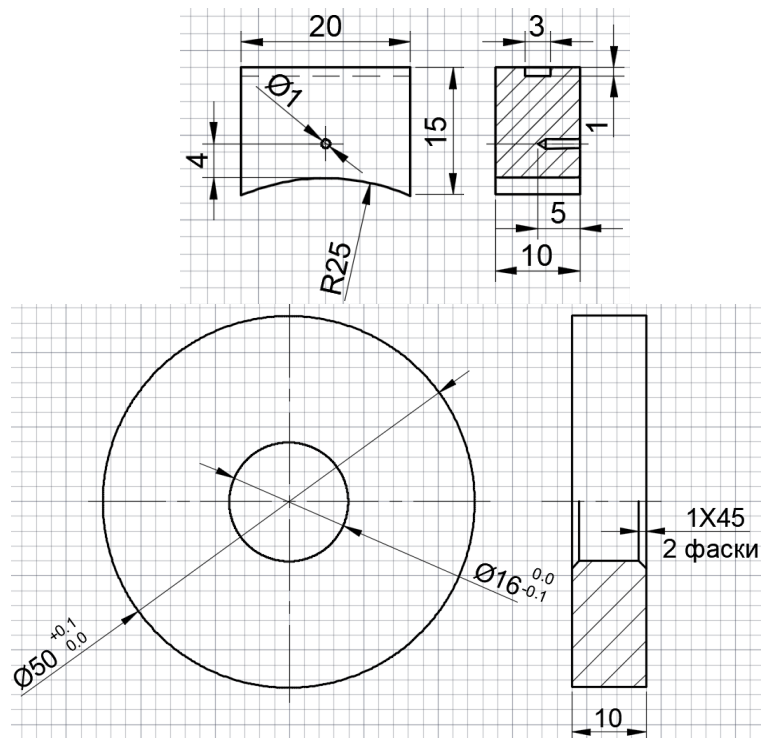


Рис. 1. Схеми: (а) зразка і (б)контртіла

Перед початком експериментів на бічних (неробочих) гранях зразків і контр тіла визначали твердість матеріалів. Вимірювання твердості (за Роквеллом, шкала HRC) здійснювали портативним твердоміром COMPUTEST SC виробництва фірми ERNST (Швейцарія) із використанням підставки, як показано на рис. 2. Навантаження на алмазний індентор у вигляді конуса з кутом при вершині 110° становило 49 Н.

Встановлено, що співвідношення твердості матеріалу контр тіла (твердість за Роквеллом, шкала HRC-35,3) до твердості зразків матеріалу рейки складає 1,1.

Величину зношування зразка визначали за допомогою безконтактного індуктивного датчика переміщення у мінімальному перерізі зразка.



Рис. 2. Твердомір COMPUTEST SC

Досліджували зношування зразків в умовах сухого тертя та тертя із змащуванням мастилом та запропонованою мастильною композицією, усі режими наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Режими тертя, що досліджувалися

Матеріал зразку	Режими тертя		
	Сухе тертя	Мастило Bio Rail	Мастило Bio Rail + нанопорошок сталі K74
Сталь K74	+	+	+

Наразі для лубрикації рейок на деяких ділянках Південно-Західної залізниці України використовують мастило марки Bio Rail фірми AIMOL [23] і тому саме воно було вибране для проведення досліджень.

Авторами патенту [24] запропоновано як присадки до промислових мастил, які використовуються для змащування важко навантажених пар тертя (зокрема, колесо – рейка) додавати нанометал складової пари тертя з меншою твердістю (у даному випадку нанометал рейки). Тому для створення мастильної композиції у мастило марки Bio Rail додавали нанопорошок сталі K74. Нанопорошок сталі K74 виготовляли методом електроерозійного диспергування гранул матеріалу присадки у 40% спиртовому середовищі [19]. В якості гранул використовували стружку із відходів механічної обробки при виготовленні зразків із сталі K74.

Отриману вказаним способом суспензію витримували у витяжній шафі до повного випаровування рідини. Висушений нанопорошок мав дисперсність 100 ... 300 нм. Вміст добавки у мастильній композиції складав приблизно 10 мас. %.

Змащування контактної пари здійснювали одноразово шляхом нанесення двох крапель чистого мастила або мастильної композиції на контактну поверхню зразка.

Результати експериментів. На думку багатьох дослідників ефективність застосування традиційних мастильних матеріалів для високонавантажених пар тертя із металевих матеріалів (наприклад, колесо – рейка) є незначною, оскільки бажаний ефект суттєвого підвищення зносостійкості досягається лише за умови одночасного значного зниження величини коефіцієнту тертя. Для пар тертя типу колесо – рейка оптимальні значення коефіцієнта тертя на поверхні кочення головки рейки знаходяться у діапазоні 0,3 ... 0,35, а на бічній грані головки рейки – 0,2 ... 0,25 [25, 26]. Оскільки при зменшенні статичного коефіцієнта тертя f коефіцієнт зчеплення коліс локомотива з рейками також зменшується (ця залежність є близької до параболічної [26]), то при суттєвому зниженні величини f режими тяги можуть стати нестаціонарними, що вплине на безпеку руху, особливо на кривих ділянках колії. Тому розглянемо, як змінюється величина коефіцієнту тертя в процесі експерименту залежно від режиму випробувань.

У режимі сухого тертя коефіцієнт тертя стрімко зростає (рис. 3) і досягає значення 0,9. Це призводить до появи на поверхні зразка дефектів, що пов'язані із значною пластичною деформацією поверхневих шарів.

Зовсім інший характер зміни коефіцієнта тертя f при змащуванні. При змащуванні чистим мастилом він спочатку дещо зменшується від початкового значення 0,22 до 0,15 (за рахунок розігріву зразка і зменшення в'язкості мастила), а потім поступово зростає до 0,3.

Добавка до мастила нанопорошку сталі K74 сприяє швидкій стабілізації величини коефіцієнта тертя на оптимальному рівні 0,25, що підтверджує можливість використання такої добавки для підвищення зносостійкості залізничних рейок.

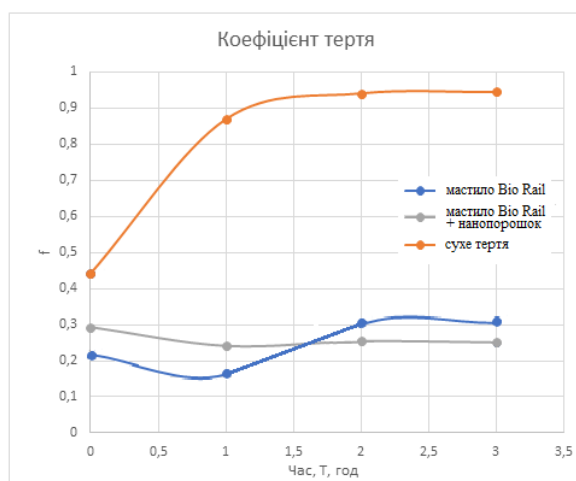


Рис. 3. Зміна у часі коефіцієнта тертя для зразків із сталі К74

На рис. 4 наведені діаграми зношування рейкової сталі для вибраних режимів тертя (див. табл. 1). Величина Δh є абсолютним показником зношування, це різниця між початковим і поточним значенням товщини зразку у мінімальному перерізі (див. рис. 1). У режимі сухого тертя зразки розігрівались майже до 330°C, це певним чином могло впливати на точність визначення величини зношування безконтактним датчиком. Проте, зважаючи на невеликі розміри зразків, їх температурне розширення можна не брати до уваги. Контрольні заміри розмірів зразків після закінчення експериментів показали, що похибки у визначенні величини зношування зразків не перевищували 4%.

Змащування значно знижує швидкість зношування зразка рейкової сталі – після трьох годин тертя його розмір у мінімальному перерізі змінився на 0,09 мм. У випадку використання мастильної композиції «мастило Bio Rail + нанопорошок сталі К74» зношування зразка за вищевказаних умов проведення експерименту взагалі не зафіксовано.

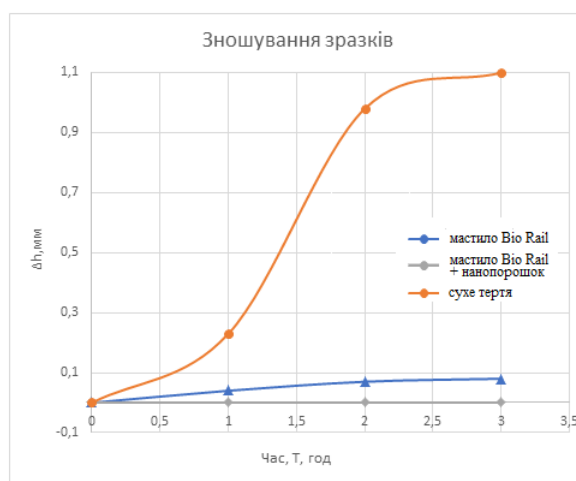


Рис. 4. Діаграми зношування зразків із сталі К74

Аналіз результатів експериментів. Для пояснення отриманих результатів була використана відома методика визначення ступеня пошкодження мікроструктури матеріалу

поверхневих шарів за параметрами розсіювання значень твердості після випробувань [27, 28], на базі якої розроблено Державний стандарт України [29]. Як основний параметр у даному нормативному документі прийнято величину m у розподілі Вейбулла, яка має сенс коефіцієнта гомогенності матеріалу. Цю величину можна визначити за формулою Гумбеля, яка при використанні чисел твердості за Роквеллом має вигляд:

$$m = 0,4343 d(n) \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{-\frac{1}{2}},$$

де величину $d(n)$ визначають за номограмою [29] залежно від кількості вимірювань n ; H_i – значення твердості за i -м вимірюванням; $\overline{\lg H}$ – середнє значення логарифма твердості за результатами n вимірювань. Згідно стандарту [29] значення коефіцієнта гомогенності m визначали за результатами 30 вимірювань, у цьому випадку $d = 1,1124$. Точність визначення m складала $\pm 0,05$.

Фізичне обґрунтування згаданої методики полягає в такому: дисперсія характеристик механічних властивостей притаманна всім матеріалам, а ступінь їх розсіювання залежить в основному від їх структурного стану. Тому за величиною параметрів закону розподілу, який описує розсіювання певних характеристик механічних властивостей (а саме – твердості) матеріалу можна оцінити характер і ступінь зміни структурного стану поверхневих шарів матеріалу конструкції в результаті термомеханічного напрацювання.

Великим значенням коефіцієнта гомогенності відповідає низький рівень розсіювання характеристик мікротвердості і, відповідно, краща організація мікроструктури поверхневих шарів матеріалу.

Оскільки у нашому випадку початкові значення коефіцієнта гомогенності та середньої (за результатом 30 вимірювань) твердості дещо відрізнялись для різних зразків (адже вони вирізались із різних частин головки рейки), то для подальшого аналізу результати вимірювань мікротвердості і обчислень ступеню пошкодження структури матеріалу представляли у відносних величинах: $\Delta H = \frac{\bar{H} - \bar{H}_0}{\bar{H}_0} \cdot 100\%$ та $\Delta m = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100\%$, де індекс 0 відповідає початковому (умовно непошкодженому) стану матеріалу.

Вимірювання мікротвердості для визначення відносних величин ΔH і Δm здійснювали портативним твердоміром COMPUTEST. Результати аналізу наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Зміна середньої твердості робочої частини зразка та коефіцієнта гомогенності за різних режимів тертя

Параметри	Режими тертя		
	Сухе тертя	Мастило Bio Rail	Мастило Bio Rail + нанопорошок сталі K74
Зміна середньої твердості, ΔH , %	+8,5	+9,8	+14,7
Зміна коефіцієнту гомогенності, Δm , %	72	31	29

Наведені дані свідчать про те, що внаслідок тертя поверхневі шари матеріалу пошкоджуються, а їхня твердість збільшується. Режим тертя суттєво впливає на ці процеси. В умовах сухого тертя ступінь пошкодження матеріалу за оцінкою зміни коефіцієнта гомогенності є найбільшою – 72%, при цьому твердість внаслідок поверхневого деформаційного зміцнення збільшується лише на 8,5%. Найменше пошкодження і водночас

найбільше зміцнення спостерігається у випадку тертя із використанням мастильної композиції «мастило Bio Rail + нанопорошок сталі K74» (див. табл. 2).

При аналізі отриманих результатів слід звернути увагу на дуже важливу деталь. При використанні як добавки до промислових мастил нанопорошків таких матеріалів як мідь, латунь, бронзи [30, 31] можуть створюватися електрохімічні пари через значну різницю електрохімічних потенціалів матеріалів деталі і добавки. Для відкритих сталевих пар тертя (наприклад, колесо – рейка) використання таких добавок є неприйнятним, оскільки на відкритому повітрі це приведе до корозії контактуючих деталей. Запропоноване використання як добавки в мастило нанопорошку із матеріалу пари тертя із меншою твердістю запобігає виникненню електрохімічної корозії.

Ще однією перевагою використання нанопорошку рейкової сталі як зносостійкої добавки до промислових мастил є його помірна вартість, оскільки вихідною сировиною для його виготовлення є відходи при виготовленні рейок.

Висновки. Запропоновано спосіб створення мастильної композиції для підвищення зносостійкості важконавантажених пар тертя, у якій як присадки для промислових мастил використовується наноматеріал пари тертя з меншою твердістю.

Результати експериментів на парах тертя «зразок матеріалу бандажу залізничного колеса – зразок матеріалу залізничної рейки» показали, що у разі використання промислового мастила марки Bio Rail з добавкою наноматеріалу пари тертя з меншою твердістю, тобто із металу рейки, зношування зразку із металу рейки після трьох годин напрацювання практично не спостерігалось. Аналогічні досліди із використанням тільки мастила промислової марки Bio Rail показали гірші результати.

Встановлено, що із використанням запропонованої мастильної композиції середнє значення коефіцієнта тертя протягом трьох годин напрацювання підтримується на рівні 0,25, що є оптимальним для пари тертя «колесо – рейка».

Також до переваг запропонованої мастильної композиції слід віднести запобігання виникненню електрохімічної корозії у відкритих сталевих парах тертя «колесо – рейка» та її помірну вартість.

Визначити необхідну концентрацію масової частки запропонованої присадки нанометалу до мастил промислових марок з метою отримання максимального ефекту підвищення зносостійкості важко навантажених пар тертя можна за зміною величини нормального тиску у зоні контакту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Карпущенко Н.И. Смазка – единственный способ предупреждения износа // Путь и путевое хозяйство. 2000. № 2. С. 15–18.
2. Д.Н. Гаркунов. Триботехника: износ и безызносность: Учебное пособие для ВУЗов. Москва, Издательство МСХА, 2001. 605 с.
3. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.: М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
4. В.М.Бузник. Ультрадисперсные и наноразмерные порошки: создание, строение, производство и применение. Томск: Изд-во НТЛ, 2009. 192с.
5. Наноматеріали і нанотехнології: навчальний посібник / Азаренков М. О. та ін. Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. 316 с.
6. Waqas, M.; Zahid, R.; Bhutta, M.U.; Khan, Z.A.; Saeed, A. A Review of Friction Performance of Lubricants with Nano Additives. Materials 2021, 14, 6310. <https://doi.org/10.3390/ma14216310>.
7. Singh, A.; Chauhan, P.; Mamatha, T. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. Mater.Today Proc. 2020, 25, 586–591.
8. Д.Н. Гаркунов. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения: М.: Машиностроение, 1982. 207 с.
9. Иванов С.П., Афанасенко В.Г., Боев Е. В., Николаев Е.А. Композиция металлосодержащей присадки. Патент РФ № 2355922. Заяв. 18.06.2007; Оpubл. 20.05.2009, Бюл. № 14.

10. Сафонов В. В., Добринский Э. К., Гороховский А. В., Буйлов В. Н., Сафонов К. В., Галкин А. А. Смазочная композиция. Патент РФ № 2525238. Заяв. 09.04.2013; Оpubл. 10.08.2014, Бюл. № 22.
11. Бабель В.Г., Гаркунов Д.Н., Лаптева В.Г. Смазка для тяжело нагруженных узлов трения. Патент РФ № 2338777. Заяв. 01.08.2007; Оpubл. 20.11.2008, Бюл. 32.
12. Kokhanovskii, V. A.; Glazunov, D. V. Selection of lubricant composition for open contact systems in rolling stock. *Russian Engineering Research*, 2016, 36(6), 449-451. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X16060113>.
13. Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil / S. Tarasov, A. Kolubaev, S. Belyaev, M. Lerner, F. Tepper // *Wear*. 2002, vol. 252. – S. 63-69.
14. Zhornik, V.I. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds / V.I. Zhornik, V.A. Kukareko, M.A. Belotserkovsky, *Advances in Mechanics Research. Volume 1* / Editors: Jeremy M. Campbell. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011, 1-78.
15. В. В. Алисин, Г. А. Симакова. Новые смазки для лубрикации рельсов высокоскоростного железнодорожного транспорта // *Техника железных дорог*. 2013. № 4. С. 48 – 51.
16. Беляев С. А., Тарасов С. Ю., Колупаев А. В., Лернер М. И. Повышение эффективности смазочного действия путем добавления нанопорошков металлов в масло // Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти генерального конструктора аэрокосмической техники, академика Н.Д. Кузнецова. Сборник трудов. Самара, 2001. Ч.2. С. 204 – 211.
17. Морохов И.Д., Трусов Л.Л., Чижик С.П. Ультрадисперсные металлические среды: М.: Атомиздат, 1977. 264 с.
18. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. М.: Энергоатомиздат, 1990. 288 с.
19. Наноматериалы и нанотехнологии в ветеринарной практике. / В.Б.Борисевич, и др: Киев, Авицена, 2012. 512 с.
20. Tarasov S. Yu., Belyaev S. A., Lerner M. I. Wear Resistance of Structural Steel in Lubricants Bearing Metal Nanopowders // *Metal Science and Heat Treatment*. 2005. Vol. 47. November 11 – 12. P. 560 – 565.
21. Ghaednia, H.; Jackson, R. L. The effect of nanoparticles on the real area of contact, friction and wear. *J. Tribol.*, **2013**, 135, 041603.
22. ГОСТ 10791 – 2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2006. 28 с.
23. Сайт компанії Aimol. URL: <http://www.aimol.nl> (дата звернення: 15.10.2021)
24. Чаусов М.Г., Косарчук В.В., Пилипенко А.П., Твердомед В.М. Спосіб підвищення зносостійкості пар тертя із металевих матеріалів. Патент України № 149049, Заяв. 07.05.2021; Оpubл. 13.10.2021.
25. Харрис У. Дж. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса / У. Дж. Харрис и др., пер. с англ. М.: Интекст, 2002. 408 с.
26. Майба И.А., Ананко А.М., Бекетов А.С., Никитина М.И. Обоснование технических требований к активаторам трения в зоне контакта «колесо – рельс» // *Вестник РГУПС*. 2016. № 4. С. 54-61.
27. Лебедев А.А., Музыка Н.Р., Косарчук В.В. Методика оценки уровня поврежденности материала конструкций. Перша науково - практична конф. “Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління”, Тези доповідей, Київ. 4-5 грудня 2003 р. с. 30-31
28. Лебедев А.А., Музыка Н.Р., Косарчук В.В., Волчек Н.Л. Метод оценки поврежденности материала конструкций // *Збірник наукових праць КУЕТТ, серія “Транспортні системи і технології”*. 2003. вип. 3. с.99-103.
29. ДСТУ 7793:2015. Матеріали металеві. Визначення рівня розсіяних пошкоджень методом LM-твердості, Київ, ДП "УкрНДНЦ". 2016. 15 с.
30. Tarasov, S. Yu.; Belyaev, S. A.; Lerner, M. I. Wear resistance of structural steel in lubricants bearing metal nanopowders. *Metal Science and Heat Treatment*. 2005, 47(11 – 12), 560-565.
31. С.Н. Комаров, В.Ф. Пичугин. Металлоплакирующие смазочные материалы для пар трения сталь-сталь // Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение, 1990. Т. 5. С. 70–85.

REFERENCES

1. Karpuschenko N.I.(2000) *Smazka – edinstvennyiy sposob preduprezhdeniya iznosa [Lubrication is the only way to prevent wear]*. Put i putevoe hozyaystvo. 2. S. 15–18. [in Russian]
2. D.N. Garkunov. (2001) *Tribotekhnika: iznos i bezyiznosnost: Uchebnoe posobie dlya VUZov [Tribotechnics: Wear and Wearlessness: Textbook for Universities]*. Moskva, Izdatelstvo MSHA, 605 s. [in Russian]
3. A.V. Chichinadze, E.M. Berliner, E.D. Braun i dr (2003) *Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika) [Friction, wear and lubrication (tribology and tribotechnics)]*. М.: Mashinostroenie. 576 s. [in Russian]
4. V.M.Buznik (2009). *Ultradispersnyie i nanorazmernyye poroshki: sozdanie, stroenie, proizvodstvo i primeneniye [Ultrafine and nanoscale powders: creation, structure, production and application]*. Tomsk: Izd-vo NTL. 192s. [in Russian]
5. Azarenkov M. O. & in (2014). *Nanomateriali i nanotekhnologiyi: navchalnyi posibnik [Nanomaterials and nanotechnologies: a textbook]*. Н. : HNU ImenI V. N. Karazina, 316 s. [in Ukrainian]
6. Waqas, M.; Zahid, R.; Bhutta, M.U.; Khan, Z.A.; Saeed, A. A Review of Friction Performance of Lubricants with Nano Additives. *Materials* 2021, 14, 6310. <https://doi.org/10.3390/ma14216310>.
7. Singh, A.; Chauhan, P.; Mamatha, T. A review on tribological performance of lubricants with nanoparticles additives. *Mater.Today Proc.* 2020, 25, 586–591.

8. D.N. Garkunov (1982). *Izбирatelnyy perenos v tyazhelonagruzhenykh uzлах treniya [Selective transfer in heavily loaded friction units]*. M.: Mashinostroenie. 207 s. [in Russian]
9. Ivanov S.P., Afanasenko V.G., Boev E. V., Nikolaev E.A. *Kompozitsiya metallosoderzhashey prisadki [The composition of the metal-containing additive]*. Patent RF # 2355922. Zayav. 18.06.2007; Opubl. 20.05.2009, Byul. # 14. [in Russian]
10. Safonov V. V., Dobrinskiy E. K., Gorohovskiy A. V., Buylov V. N., Safonov K. V., Galkin A. A. *Smazochnaya kompozitsiya [Lubricant composition]*. Patent RF # 2525238. Zayav. 09.04.2013; Opubl. 10.08.2014, Byul. # 22. [in Russian]
11. Babel V.G., Garkunov D.N., Lapteva V.G. *Smazka dlya tyazhelonagruzhenykh uzlov treniya [Lubricant for heavy-duty friction units]*. Patent RF # 2338777. Zayav. 01.08.2007; Opubl. 20.11.2008, Byul. 32. [in Russian]
12. Kokhanovskii, V. A.; Glazunov, D. V. Selection of lubricant composition for open contact systems in rolling stock. *Russian Engineering Research*, 2016, 36(6), 449-451. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068798X16060113>.
13. Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil / S. Tarasov, A. Kolubaev, S. Belyaev, M. Lerner, F. Tepper // *Wear*. 2002, vol. 252. – S. 63-69.
14. Zhornik, V.I. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds / V.I. Zhornik, V.A. Kukareko, M.A. Belotserkovsky, *Advances in Mechanics Research*. Volume 1 / Editors: Jeremy M. Campbell. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011, 1-78.
15. V. V. Alisin, G. A. Simakova (2013). *Novyye smazki dlya lubrikatsii relsov vyisokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta [New lubricants for the lubrication of rails of high-speed rail transport]*. *Tehnika zheleznykh dorog*. 4. S. 48 – 51. [in Russian]
16. Belyaev S. A., Tarasov S. Yu., Kolupaev A. V., Lerner M. I. (2001). *Povyshenie effektivnosti smazochnogo deystviya putem dobavleniya nanoporoshkov metallov v maslo [Increasing the efficiency of the lubricating action by adding metal nanopowders to the oil]*. Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya, posvyaschennaya pamyati generalnogo konstruktora aerokosmicheskoy tekhniki, akademika N.D. Kuznetsova. *Sbornik trudov*. Samara, Ch.2. S. 204 – 211. [in Russian]
17. Morohov I.D., Trusov L.L., Chizhik S.P. (1977). *Ultradispersnyie metallicheskie sredy [Ultradisperse metal media]*. M.: Atomizdat. 264 s. [in Russian]
18. Burtsev B.A., Kalinin H.B., Luchinskiy A.V. (1990). *Elektricheskiy vzryiv provodnikov i ego primeneniye v elektrofizicheskikh ustanovkakh [Electric explosion of conductors and its application in electrophysical installations]*. M.: Energoatomizdat, 1990. 288 s. [in Russian]
19. V.B. Borisevich & dr. (2012). *Nanomaterialy i nanotehnologii v veterinarnoy praktike [Nanomaterials and nanotechnologies in veterinary practice]*. Kiev, Avitsena, 512 s. [in Russian]
20. Tarasov S. Yu., Belyaev S. A., Lerner M. I. *Wear Resistance of Structural Steel in Lubricants Bearing Metal Nanopowders // Metal Science and Heat Treatment*. 2005. Vol. 47. November 11 – 12. P. 560 – 565.
21. Ghaednia, H.; Jackson, R. L. The effect of nanoparticles on the real area of contact, friction and wear. *J. Tribol.*, 2013, 135, 041603.
22. GOST 10791 – 2011. *Kolesa tselnokatyaniye. Tehnicheskie usloviya [Wheels are solid-rolled. Specifications]*. M.: Standartinform, 2006. 28 s. [in Russian]
23. Sayt kompaniyi Aimol. Retrieved from <http://www.aimol.nl>
24. Chausov M.G., Kosarchuk V.V., Pilipenko A.P., Tverdomed V.M. *Sposib pidvischennya znosostiykosti par tertya iz metalevikh materialiv [Method of increasing wear resistance of friction pairs made of metallic materials]*. Patent Ukraini # 149049, Zayav. 07.05.2021; Opubl. 13.10.2021. [in Ukrainian]
25. Harris U. Dzh. (2002) *Obobscheniye peredovogo opyita tyazhelovesnogo dvizheniya: voprosy vzaimodeystviya kolesa i relsa [Summarizing the best practices of heavy haul traffic: wheel-rail interaction issues]* per. s angl. M.: Intekst. 408 s. [in Russian]
26. Mayba I.A., Ananko A.M., Beketov A.S., Nikitina M.I. (2016). *Obosnovaniye tekhnicheskikh trebovaniy k aktivatoram treniya v zone kontakta «koleso – rels» [Substantiation of technical requirements for friction activators in the wheel-rail contact zone]*. *Vestnik RGUPS*. 4. S. 54-61. [in Russian]
27. Lebedev A.A., Muzyika N.R., Kosarchuk V.V. (2003). *Metodika otsenki urovnya povrezhdennosti materiala konstruktivnyy [Methodology for assessing the level of damage to the material of structures]*. Persha naukovo - praktichna konf. “Problemi ta perspektivi rozvitku transportnih sistem: tekhnika, tekhnologiya, ekonomika i upravlinnya”, Tezi dopovldey, KiYiv. 4-5 grudnya 2003 r. s. 30-31 [in Russian]
28. Lebedev A.A., Muzyika N.R., Kosarchuk V.V., Volchek N.L. (2003). *Metod otsenki povrezhdennosti materiala konstruktivnyy [Methodology for assessing the level of damage to the material of structures]*. *Zbirnik naukovih prats KUETT*, seriya “Transportni sistemi i tekhnologii”. 3. s.99-103. [in Russian]
29. DSTU 7793:2015. (2016) *Materiali metalevi. Vznachennya rivnya rozsiyanih poshkodzhen metodom LM-tverdosti [Metallic materials. Determination of the level of scattered damage by LM-hardness method]*, Kyiv, DP "UkrNDNTs". 15 s. [in Ukrainian]
30. Tarasov, S. Yu.; Belyaev, S. A.; Lerner, M. I. *Wear resistance of structural steel in lubricants bearing metal nanopowders. Metal Science and Heat Treatment.* 2005, 47(11 – 12), 560-565.

31. S.N. Komarov, V.F. Pichugin. (1990). *Metalloplakiruyuschie smazochnyie materialyi dlya par treniya stal-stal [Metal-cladding lubricants for steel-to-steel friction pairs]*. Dolgovechnost truschihsya detaley mashin. M.: Mashinostroenie. T. 5. S. 70–85. [in Russian]

Valerii Kosarchuk¹, Mykola Chausov², Volodymyr Tverdomed³, Andriy Pilipenko⁴, Oleksandr Aharkov^{5*}

¹ Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

² Professor, Department of Mechanics, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroiv Oborony str., 03041, Kyiv, Ukraine

³ Assistant professor, Railway Track and Track Facilities Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

⁴ Assistant professor, Department of Mechanics, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroiv Oborony str., 03041, Kyiv, Ukraine

⁵ Assistant professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, State University of Infrastructure and Technologies, 9, Kyrylivska str., Kyiv, 04071, Ukraine

LUBRICANT COMPOSITION FOR INCREASING WEAR RESISTANCE OF HEAVY-LOADED FRICTION PAIRS

The proposed new lubricating composition, which significantly reduces the wear resistance of the rails and wheels of rolling stock during operation, prevents electrochemical corrosion of friction pairs “wheel – rail” and, most importantly, stabilizes the coefficient of friction at the optimum level after a relatively short operating time.

The experiments performed on the friction pair “sample of the bandage material of the railway wheel – a sample of the rail material” at the ratio of hardness at the bandage material (Rockwell hardness, HRC scale - 35.3) to the hardness of the rail material 1,1. Test results show that in the case of industrial lubricant, the BioRail brand, with the addition of nanomaterial friction pair with lower wear hardness of the rail metal sample after three hours in operation was practically not observed. Moreover, the average value of the friction coefficient for three hours of operation had been maintained at the level 0.25, which is optimal for the friction pair “wheel – rail”.

Keywords: lubricating composition, wear resistance, rails, wheels of rolling stock, nanomaterial.