

УДК 621.89

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.204201

## Встановлення закономірності впливу двошарового мащення на зносостійкість залізничних рейок

С. В. Воронін, Б. С. Асадов, Д. В. Онопрейчук, В. О. Стефанов, І. С. Груник  
В. В. Пащенко, О. Є. Забула, О. М. Головань, Ю. М. Черніченко,  
О. С. Харківський

*Наведені результати експериментального дослідження впливу двошарового мащення, що формується з графітового порошку та базових молекул індустріальної оливи, на зносостійкість бічної поверхні головки залізничної рейки. Так, при збільшенні концентрації графітового порошку в оливі від 0 до 3 % при навантаженні 363–646 N величина зношування зменшується на 42–29,7 % відповідно.*

*Методика досліджень передбачала моделювання процесу тертя кочення з проковзуванням за допомогою роликів на машині тертя СМЦ-2. Саме такий вид тертя має місце в трибосистемі гребінь колеса – бічна поверхня головки рейки в кривих ділянках колії. Також передбачалась подача оливи аерозольним способом. Варіювались два незалежних фактори: концентрація графітового порошку в індустріальній оливі И-12А та зовнішнє навантаження. Незмінними факторами залишались частота обертання роликів, що забезпечувало стабільне проковзування на рівні 20 %, температура оливи, час проведення кожного випробування.*

*Результати експерименту дозволили отримати рівняння регресії, яке описує закономірність зношування ролика пари тертя «ролик-ролик» в залежності від обраних факторів.*

*На завершальному етапі роботи був проведений розрахунок ресурсу рейки в кривій ділянці колії. Результати розрахунку ресурсу залізничної рейки за умов збільшення концентрації графітового порошку від 0 до 3 % при зовнішніх навантаженнях від 363 до 646 N показали приріст ресурсу рейки від 40 до 61 %. Розрахунок базувався на отриманих експериментальних даних, що характеризують процес тертя бічної поверхні головки рейки з гребенем колеса в кривій ділянці колії за умов двошарового мащення при різних навантаженнях. Двошарове мащення формувалось шляхом аерозольного нанесення оливи на поверхню тертя з різною концентрацією графіту.*

*Отриманні дані дають можливість прогнозувати строк служби залізничних рейок в кривих за умов двошарового мащення*

*Ключові слова: графітовий порошок, двошарове мащення, колесо - рейка, трибологічна система, зносостійкість, аерозоль*

### 1. Вступ

Досвід експлуатації залізниць показує, що однією з головних проблем під час взаємодії рухомого складу з колією є взаємодія колеса та рейки. Це пов'язано з високими контактними напруженнями, що виникають в зоні контакту та впливають на стан такої трибосистеми. Особливо складним та важливим

є питання взаємодії колісної пари в кривій ділянці, оскільки колесо (в основному) контактує з рейкою в двох різних точках. Тобто, утворює площу контакту на поверхні катання рейки та на боковій поверхні головки рейки – двоточковий контакт. В зоні дотику бокової поверхні рейки та гребеня колеса реалізується процес тертя кочення з проковзуванням. Цей процес, через різний ступінь зношення гребеня та бокової грані рейки, супроводжується зміною форми розподілу тисків. Площа контакту зменшується, що призводить до підвищення контактних тисків [1]. В сукупності ці процеси призводять до появи ряду дефектів [2–4] та підвищення інтенсивності зношування рейок в кривих ділянках колії. Вирішення цієї проблеми є актуальним і на сьогоднішній день, оскільки впливає на матеріальні та енергетичні витрати, а найголовніше на безпеку руху [5–9].

## **2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

Основним шляхом вирішення проблеми підвищення зносостійкості рейок в кривих ділянках колії є нанесення на бічну поверхню головки рейки мастильного матеріалу. Він повинен забезпечити зменшення інтенсивності зношування шляхом зменшення контактних тисків. Це можливо за умови реалізації двошарового мащення.

При двошаровому мащенні утворюються два шари. Перший (підкладка) утворюється з легуючих добавок до яких відносяться мікро- або наночастинки металів, графіту, дисульфиду молібдену, природних мінералів тощо. Він виконує функцію розподілу зовнішніх навантажень за рахунок заповнення впадин мікронерівностей поверхонь. Це сприяє зменшенню фактичних тисків та розширенню діапазону існування другого шару. Другий (кристалічний шар) утворюється з поверхнево-активних речовин ПАР (молекул присадки) або базових молекул мастильного матеріалу, які сприймають зовнішнє розподілене навантаження. Таке поєднання шарів значно зменшує коефіцієнт тертя за рахунок реалізації зсуву в полікристалічному шарі ПАР. Отже, реалізація двошарового мащення можлива шляхом застосування мастила або оливи за умови наявності в них легуючих добавок певної концентрації.

Доцільність використання мастильних матеріалів з легуючими добавками в трибосистемах, зокрема колеса-рейка, присвячено ряд робіт [10–17]. Так, в роботі [10] досліджувався вплив десяти різних типів мастил на коефіцієнт тяги, стійкість та знос в умовах «повного мащення» та «мастильного голодування». Але не було встановлено впливу концентрації певних легуючих добавок на зносостійкість рейкової сталі, оскільки використовувались різні типи мастильних матеріалів зі своїми пакетами присадок. В роботі [11] описані результати впливу основних характеристик різних мастильних матеріалів, що використовуються для змащення пари тертя «колесо-рейка», на сили в контактах колеса з рейкою та динаміку рухомого складу. Але не розкритими залишились питання залежності зносостійкості бокової поверхні головки рейки від легуючих добавок в мастильних матеріалах. Частково це питання було вирішено в роботі [12]. В оливу, що подавалася в пару тертя «колесо-рейка», потрапляли продукти зносу взаємодії колеса з рейкою і утворювали пастоподібну речовину, яка сприяла зменшенню коефіцієнтен тертя. Однак в роботі не було встановлено відсоткової

кількості таких продуктів зносу та їх безпосередній вплив на зносостійкість залізничної рейки. Вплив концентрації легуючої добавки дисульфиду молібдену до мастила на процес зносу хромованих сталевих кульок було розглянуто в роботі [13]. В даній роботі був реалізований процес тертя кочення, що не відповідає процесу тертя між гребенем колеса та боковою почерхнею головки рейки – кочення з проковзуванням. Більш якісно процес впливу двошарового мащення на тертя відображено в роботі [14]. В якості легуючої добавки до титанового мастила, що утворює підкладку, використовувався нано-графіт з трьома середніми розмірами частинок діаметру (2 мкм, 3,5 мкм і 6 мкм). Визначено, що оптимальна концентрація трьох типів нано-графіту становить 0,8 мас.%, 1,0 мас. % та 1,2 мас. %. Окрім того, оптимальне мащення титановим складним мастилом, є мащення з концентрацією нано-графіту 0,8 мас.%. Але дослідження проводились на чотири кульковій машині тертя, що не відповідає процесам, які реалізуються в парі тертя «бічна поверхня головки рейки – гребінь колеса». Реалізація двошарового мащення з використанням оливи з наночастинками вуглецю в якості легуючих добавок відображена в роботі [15]. В цьому дослідженні встановлено зменшення показника зносу на 11 %. Показник зносу визначався на чотирикульковій машині тертя, де реалізовувався точковий контакт металевих кульок, але дана методика не дозволяє реалізовувати процес тертя кочення з проковзуванням. Також не було встановлено залежностей зміни показника зносу від концентрації наночастинок вуглецю. В роботі [16] було встановлено раціональну концентрацію в індустріальній оливі вуглецевої сажі, що є легуючою добавкою, при якій спостерігається мінімальний знос. Але моделювалась пара тертя ковзання «сталь-бронза».

Реалізація двошарового мащення аерозольним способом була розглянута в роботі [17]. В якості оливи з легуючими добавками була використана товарна олива *Liqui Moly 10W40* з дисульфідом молібдену. Але акцент був зроблений на встановленні параметрів аерозольного рейкозмашувача з метою забезпечення стійкості двошарового мащення на бічній поверхні головки рейки. Олива *Liqui Moly* є товарною і невідомою була концентрація легуючої добавки.

Отже, проведений аналіз дозволяє стверджувати, що доцільним є проведення досліджень впливу концентрації графіту в індустріальній оливі через реалізацію двошарового мащення на зносостійкість залізничних рейок шляхом аерозольного нанесення.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою дослідження є встановлення закономірності впливу двошарового мащення на зносостійкість залізничних рейок. Це дасть можливість теоретико-експериментально обґрунтувати використання мащення в кривих ділянках колії з врахуванням вантажонапруженості, а також прогнозувати ресурс рейок в залежності від вантажонапруженості за умов двошарового мащення.

Для досягнення мети було поставлене таке завдання:

– визначити зміну зносу рейкової сталі в залежності від концентрації графітового порошку та зовнішнього навантаження.

– встановити ресурс залізничної рейки в залежності від концентрації графітового порошку за різних зовнішніх навантажень.

#### 4. Матеріали та методи дослідження впливу двошарового мащення на зносостійкість залізничних рейок

##### 4.1. Матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

Дослідження проводилось в лабораторних умовах. Для цього була розроблена лабораторна установка, яка давала можливість моделювати трибологічні процеси в парі тертя «гребінь колеса – залізнична рейка». Схема установки зображена на рис. 1.

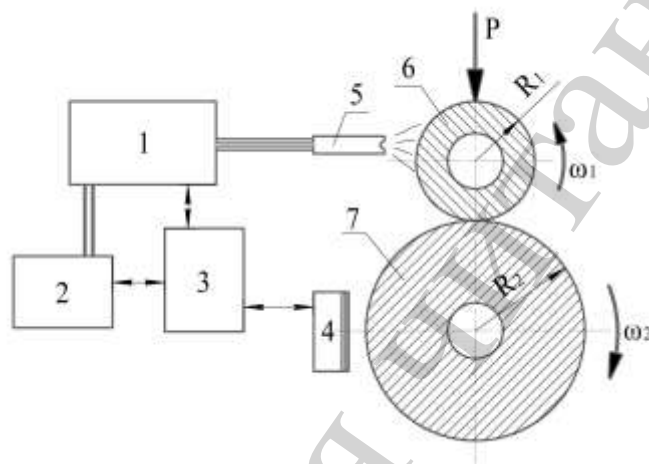


Рис. 1. Схема установки для проведення досліджень на зношування: 1 – блок регулювання подачі оливи та повітря; 2 – повітряний компресор; 3 – електронний блок управління; 4 – датчик обертів; 5 – форсунка; 6 – ролик (рейкова сталь); 7 – ролик (колісна сталь)

В якості фізичної моделі пари тертя «гребінь колеса – залізнична рейка» було обрано пару тертя «ролик-ролик». Саме така пара дає можливість реалізувати процес тертя кочення з проковзуванням при невеликій площі контакту. Ролики були виготовлені з аналогічних матеріалів, що використовуються для виготовлення залізничних рейок та гребенів коліс.

Ролики монтувались на машину тертя СМЦ-2, що давало змогу регулювати швидкість обертання та створювати зовнішнє навантаження. Аерозольне нанесення мастильного матеріалу в пару тертя забезпечувала форсунка 5 до якої по коаксіальному трубопроводу подавалось повітря й олива від блоку регулювання подачі 1. Керував системою електронний блок управління 3, який за допомогою компресора 2 підтримував тиск в системі та знімаючи показники з датчика 4 регулював процесом впорскування мастильного матеріалу.

В якості мастильного матеріалу використовувалась індустріальна олива підгрупи А марки И-12А за ГОСТ 20799-88, оскільки вважається найбільш чистою з точки зору наявності «присадок». Графіт використовувався марки С-0, а саме препарат колоїдно-графітовий за ТУ 113-08-48-63-90 з основним розміром частинок 1–2 мкм. Концентрація в дослідних зразках оливи знаходилась в межах 0–3 %. Це

пов'язано з вимогами до мастильного матеріалу за умов реалізації двошарового мащення шляхом аерозольного нанесення, які обґрунтовані в роботах [18, 19].

Знос зразків визначався методом встановлення втрати їх маси за час випробувань, який становив 1 годину. Зважування зразків проводилося аналітичними вагами ВЛА-200г-М з точністю 0,0005 г.

#### 4. 2. Методика визначення впливу двошарового мащення на знос залізничних рейок

Для реалізації тертя кочення з проковзуванням на установці рис. 1, першочерговим завданням було максимально змоделювати трибофізичні процеси, що відбуваються в зоні контакту реборди та бокової поверхні головки рейки. Для цього був проведений розрахунок контурної площі контакту з врахуванням результатів робіт [1, 20–23], що становила  $120 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . Знаючи контурну площу контакту реборди та бокової поверхні головки рейки, а також шорсткість їх поверхонь та навантаження було розраховано фактичну площу контакту. Через фактичну площу контакту та сили, що діють від реборди колеса на бокову поверхню головки рейки [20–23], було визначено питомий тиск, що діє в зоні контакту. За отриманими результатами відбувся перерахунок навантажень для проведення експерименту за виразом

$$P = \frac{\pi \cdot H_{rol} \cdot \left( \frac{P_{bok}}{S_{kon}} \right)^2 \cdot \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}, \quad (1)$$

де  $H_{rol}$  – ширина роликів, що випробовуються, м;  $P_{bok}$  – бокове навантаження колісної пари на рейку, Н;  $S_{kon}$  – фактична площа контакту «колесо-рейка»,  $\text{м}^2$ ;  $\mu_1$  – коефіцієнт Пуасона рейкової сталі;  $\mu_2$  – коефіцієнт Пуасона колісної сталі;  $E_1$  – модуль пружності рейкової сталі;  $E_2$  – модуль пружності колісної сталі;  $R_1$  – радіус ролика (рейкова сталь);  $R_2$  – радіус ролика (колісна сталь).

Отже, умови проведення експерименту наступні:

- радіус ролика  $R_1$  0,0125 м,  $R_2$  – 0,04 м;
- ширина ролика 0,01 м;
- частота обертання роликів  $n_1=240$  об/хв.,  $n_2=300$  об/хв., (відповідно проковзування складає 20 %);
- частота обертання шпинделя,  $n=300$  об/хв.;
- стабілізована температура резервуара з оливою,  $t=20 \pm 5$  °С;
- час проведення одного випробування,  $t=1$  година.

Таким чином, визначені умови проведення експерименту та діапазон коливань незалежних факторів, що наведені в табл. 1.

З метою визначення мінімально необхідної повторюваності дослідів, попередньо було проведено десять вимірювань зносу ролика  $R_1$  пари «ролик-ролик». При вимірюваннях використовувалась індустріальна олива И-12А без додаван-

ня графітового порошку. Температура оливи під час вимірювань складала 20 °С, а зовнішнє навантаження на пару тертя 530 N. Результати попередніх випробувань наведені в табл. 2.

Таблиця 1  
Незалежні фактори і умови експерименту

Незалежні фактори		Умови експерименту			
$P$ , (N)	$C$ , (%)	$\omega_1$ , об/хв	$\omega_2$ , об/хв	$R_1$ , m	$R_2$ , m
363	0	240	300	0,0125	0,04
495	1,5				
646	3				

Таблиця 2  
Результати попередніх випробувань для визначення мінімально необхідної кількості дослідів

№ досліду	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Знос ролика, mg	35,329	36,375	36,06	35,518	36,504	35,928	36,839	36,676	36,423	36,197

Базуючись на теорії планування експерименту та методів статистичної обробки результатів механічних вимірювань [24, 25], був проведений розрахунок необхідної мінімальної кількості дослідів, результати якого наведені в табл. 3.

Мінімальна необхідна повторність дослідів визначалась за залежністю:

$$n_{\min} \geq \frac{\sigma^2 \cdot t_{\text{кр}}^2}{\Delta^2 \cdot m^2}, \quad (2)$$

де  $\sigma$  – середнє арифметичне відхилення вимірів;  $t_{\text{кр}}$  – табличне значення коефіцієнта Стюдента при заданій надійності результатів виміру  $P=0,9$  та кількості дослідів  $n=10$ ,  $t_{\text{кр}}=1,81$  [24];  $\Delta$  – допустима відносна похибка виміру ( $\Delta=0,02$  [25]);  $m$  – середнє арифметичне значення результатів вимірювання.

Таблиця 3  
Результати розрахунку мінімальної кількості дослідів на машині тертя СМЦ-2

Показник, що вимірюється	Середнє квадратичне відхилення вимірювань, $\sigma$	Середнє арифметичне значення результатів вимірювання $m$	Мінімальна необхідна повторність дослідів, $n_{\min}$
Знос ролика	0,235861	36,1849	1,475359

Отже, мінімальна повторність дослідів,  $n_{\min}=2$ .

Програмою проведення експериментальних досліджень передбачалась реалізація одного 2-х факторного експерименту, де функцією відгуку був знос ролика в парі «ролик-ролик» (табл. 4).

Для отримання залежностей у вигляді рівнянь регресії був вибраний ортогональний план експерименту, який дозволив з мінімальною кількістю дослідів визначити коефіцієнти рівнянь при заданій довірчій імовірності.

Таблиця 4

Програма проведення експериментальних досліджень зносу ролика  $R_1$  пари тертя «ролик-ролик» на машині тертя СМЦ-2

№ експерименту	Функція відгуку	Марка оливи	Присадка, %	Зовнішнє навантаження, N
1	Знос ролика $R_1$ , mg	И-12А	Концентрація графітового порошку (0–3 %) в оливі	363–646 N

Згідно рекомендацій [25, 26], були вибрані рівні варіювання факторів (табл. 5) та був сформований ортогональний план двох-факторного експерименту, табл. 6.

Таблиця 5

Рівні варіювання факторів

Рівень	Код	Зовнішнє навантаження $P$ , N; $X_1$	Концентрація графітового порошку $C$ , %; $X_2$
Нижній рівень	–1	363	0
Нульовий рівень	0	495	1,5
Верхній рівень	+1	646	3

Таблиця 6

Ортогональний план двох-факторного експерименту

№ п/п	Кодовані значення		Натуральні значення	
	$X_1$	$X_2$	Зовнішнє навантаження $P$ , N	Концентрація графітового порошку $C$ , %
1	0	1	495	3
2	1	0	646	1,5
3	–1	–1	363	0
4	–1	0	363	1,5
5	1	1	646	3
6	0	–1	495	0
7	1	–1	646	0
8	–1	1	363	3
9	0	0	495	1,5

Отже, для визначення впливу концентрації графітового порошку та зовнішнього навантаження на зношування ролика  $R_1$  пари «ролик-ролик» було проведено 1 двох-факторний експеримент. В цьому експерименті проводилось 9 дослідів із подвійною повторністю кожен.

## 5. Результати досліджень впливу двошарового мащення на зносостійкість залізничних рейок

### 5.1. Результати зміни зносу рейкової сталі в залежності від концентрації графітового порошку та зовнішнього навантаження

Результати експериментальних досліджень на машині тертя СМЦ-2 наведені в табл. 7.

Таблиця 7

Результати експериментальних досліджень визначення зносу ролика  $R_1$  пари тертя «ролик-ролик» від концентрації графітового порошку в оливі И-12А та зовнішнього навантаження

№ з/п	Знос ролика $R_1$ , mg		
	$I_1$	$I_2$	$I_{СЕР}$
1	19,108	18,676	18,892
2	55,558	55,189	55,3735
3	10,046	10,261	10,1535
4	6,473	6,890	6,6815
5	50,812	51,022	50,917
6	28,041	28,855	28,448
7	72,568	72,267	72,4175
8	5,910	5,949	5,9295
9	20,650	21,369	21,0095

За результатами проведених досліджень отримано рівняння регресії, яке описує закономірність зношування ролика  $R_1$  пари тертя «ролик-ролик» в залежності від обраних факторів із застосуванням оливи И-12А (4). З метою підвищення адекватності отриманої моделі, відійшли від поліноміального запису рівняння та за допомогою програмного пакету «STATISTICA» було підібране рівняння у загальному вигляді

$$I = a \cdot P^2 - b \cdot P - \frac{c}{C+1} + \frac{d \cdot P}{C+1} + e, \quad (3)$$

де  $a, b, c, d, e$  – коефіцієнти рівняння.

Коефіцієнти рівняння також обраховані в програмному комплексі «STATISTICA», а кінцеве рівняння регресії має вигляд

$$I = 0,00054 \cdot P^2 - 0,3775 \cdot P - \frac{35,4988}{C+1} + \frac{0,1094 \cdot P}{C+1} + 72,6439, \quad (4)$$

де  $I$  – ваговий знос ролика, mg;  $P$  – навантаження на ролик, N;  $C$  – концентрація графітового порошку в оливі, %.



Перевірка відтворюваності дослідів проводилась за критерієм Кохрена [24, 25], а перевірка адекватності моделі виконувалась за допомогою критерію Фішера [24].

Результати перевірки на відтворюваність та адекватність наведені в наступних рівняннях:

– визначення зносу ролика  $R_1$

$$G_C = 0,323960 \leq 0,6385,$$

$$F_F = 5,271159975 \leq 6,1631.$$

Отримане рівняння регресії адекватне отриманим результатам експериментальних досліджень, тому їх можливо використовувати для аналізу досліджень.

Графічне зображення результатів випробувань впливу концентрації графітового порошку на зміну зносу ролика  $R_1$  пари тертя «ролик-ролик» при зовнішньому навантаженні (363–646 N) на машині СМЦ-2 зображені на рис. 2 та рис. 3.

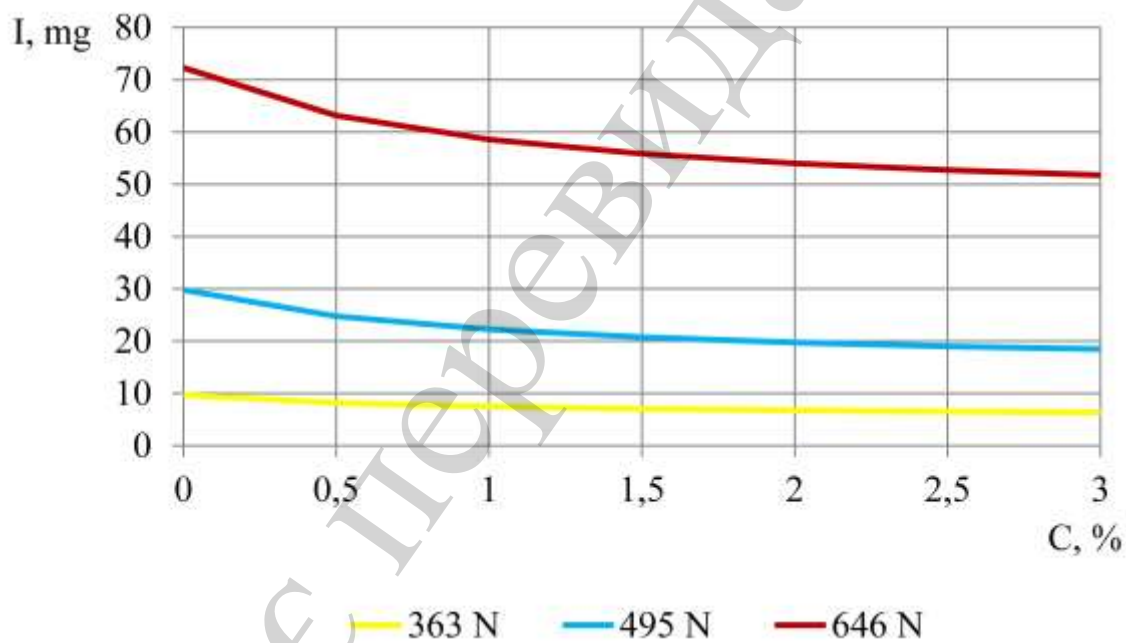


Рис. 2. Зміна величини зношення ролика  $R_1$  в залежності від концентрації графітового порошку в індустріальній оливі И-12А за різних зовнішніх навантажень

За результатами досліджень (рис. 2, 3) встановлено залежність зміни зношення ролика  $R_1$  від концентрації графітового порошку в оливі та від зовнішнього навантаження. Виявлено, що при збільшенні концентрації від 0 до 3 % при зовнішніх навантаженнях від 363 N до 646 N спостерігається зменшення зносу ролика.

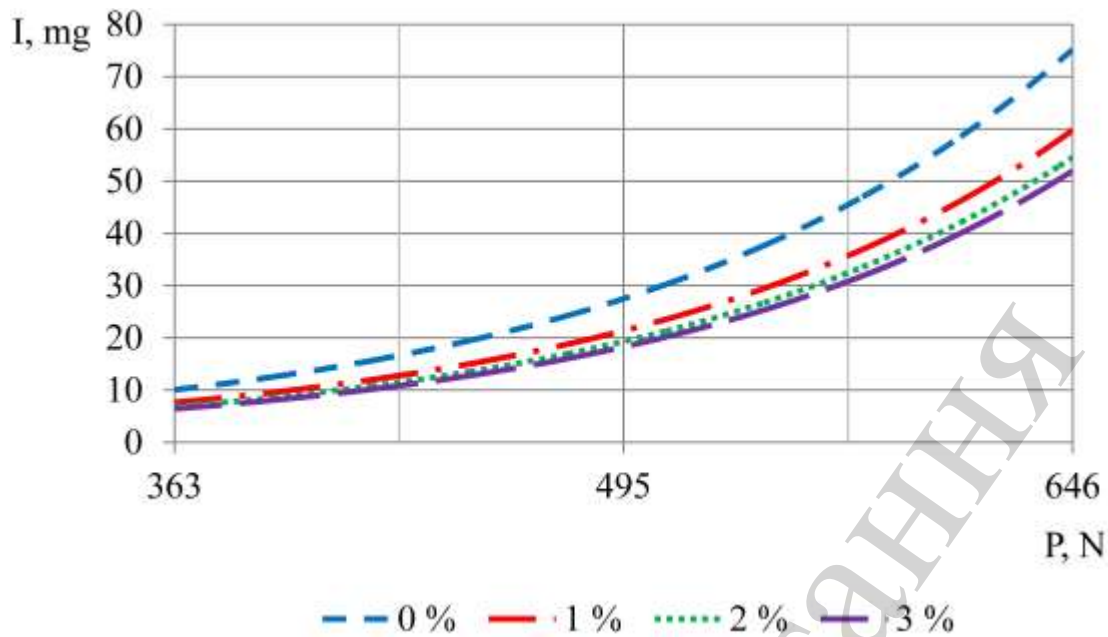


Рис. 3. Зміна величини зношування ролика  $R_1$  в залежності від зовнішнього навантаження при різних концентраціях графітового порошку в оливі II-12A

### 5. 2. Розрахунок ресурсу залізничної рейки в залежності від концентрації графітового порошку за різних зовнішніх навантажень

Отримані експериментальні данні щодо впливу двошарового мащення за різної концентрації графітового порошку на зношування ролика при різних навантаженнях, дають можливість перерахунку ресурсу залізничних рейок за цих умов. Ресурс рейок доцільно визначати в тоннах пропущеного вантажу.

Отже, ресурс рейок визначатиметься

$$T = \frac{S_{rol} \cdot h_{lim} \cdot \rho_{st} \cdot m_{vag}}{I_{IC} \cdot n_{par}}, \quad (5)$$

де  $S_{rol}$  – площа робочої поверхні ролика,  $m^2$ ;  $h_{lim}$  – граничне значення бокового зносу рейки,  $m$ ;  $\rho_{st}$  – густина рейкової сталі,  $kg/m^3$ ;  $m_{vag}$  – маса вагону,  $t$ ;  $n_{par}$  – кількість колісних пар на одному вагоні, од;  $I_{IC}$  – ваговий знос ролика за один оберт,  $mg/об$ .

Невідомим у виразі (5) є ваговий знос ролика за один оберт, що визначається

$$I_{IC} = \frac{I}{\omega \cdot t}, \quad (6)$$

де  $\omega$  – частота обертів ролика,  $об/хв$ ;  $t$  – тривалість одного дослідження,  $хв$ ;  $I$  – ваговий знос ролика,  $mg$ .

Підставивши вираз (6) у (5) отримаємо

$$T = \frac{S_{rol} \cdot h_{lim} \cdot \rho_{st} \cdot \omega \cdot t}{I} \cdot \frac{m_{vag}}{n_{par}}. \quad (7)$$

Графічна інтерпретація розрахунку ресурсу рейок наведена на рис. 4.

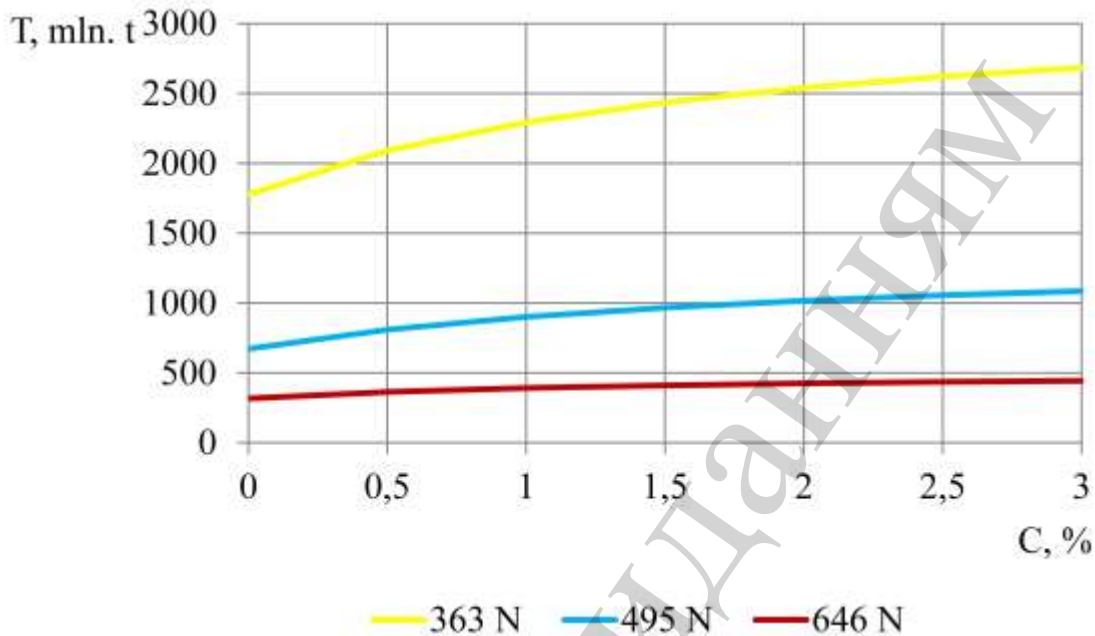


Рис. 4. Ресурс залізничної рейки в залежності від концентрації графітового порошку в індустріальній оливі И-12А за різних зовнішніх навантажень

Результати розрахунку ресурсу залізничної рейки (рис. 4) за умов збільшення концентрації графітового порошку від 0 до 3 % при зовнішніх навантаженнях від 363 N до 646 N показали приріст ресурсу рейки від 40 % до 61 %.

#### 6. Обговорення результатів дослідження впливу концентрації графітового порошку на зносостійкість залізничних рейок

Зменшення зношування пари тертя «колесо-рейка» при концентрації графітового порошку в оливі від 0 до 3 % пов'язане з впливом двошарового мащення на характеристики тертя (рис. 2). Перш за все, це пов'язано з заповненням мікроскопічних нерівностей поверхні контакту шаром твердої антифрикційної добавки, яким є графіт. Даний процес сприяє збільшенню фактичної площі контакту майже до розмірів контурної, що призводить до рівномірного розподілу зовнішнього навантаження і, як наслідок, зменшення питомого тиску в зоні контакту «гребінь колеса – бічна поверхня головки рейки». Також це позитивно впливає на утворення граничного шару з молекул (в даному випадку) базової оливи И-12А. Адже відомо, що граничні шари утворюються лише на фактичній площі контакту, тобто на деформованих (або зношених) верхівках мікроскопічних виступів поверхонь тертя, які постійно утворюються за рахунок пружно-пластичного контакту, зсуву або зрізу мікрорівнів. Тобто, збільшення фактичної площі контакту до величини контурної дає можливість розширити

діапазон формування та дії полімолекулярного граничного шару, а також збільшення несучої здатності за рахунок щільнішого пакування молекул. Таке поєднання двох шарів призводить до зменшення сил тертя в зоні контакту за рахунок реалізації «легкого» зсуву в полімолекулярному граничному шарі. Саме таким чином підвищується зносостійкість бічної поверхні головки рейки при взаємодії з гребенем колеса за умов двошарового мащення.

Результати роботи підтверджують висновки попередніх наукових досліджень [3, 4, 15–18, 28–30], щодо позитивного використання мастильних матеріалів з легуючими добавками в парі тертя «колесо-рейка». Але слід зауважити, що в роботах [10, 11, 13, 14] використовували пластичні мастила, а в роботах [14, 15, 28, 29] в якості добавок до олив застосовували різні форми вуглецю та нанесення мастильних матеріалів в даних дослідженнях відбувалось не аерозольним способом. Також слід відмітити, що собівартість отримання легуючих добавок на основі різних форм вуглецю на порядок вища ніж графітовий порошок.

Обмеження роботи полягають в тому, що отримувати адекватні результати можливо за таких умов:

- наявність індустріальної оливи підгрупи А марки И-12А за ГОСТ 20799-88,
- концентрація графітового поршку марки С-0 за ТУ 113-08-48-63-90 з основним розміром частинок 1–2 мкм в оливі 0–3 %,
- зовнішнє навантаження в межах 363–646 N,
- припрацьована пара тертя, виготовлена з рейкової сталі марки М-76 з однаковою міцністю.

Безумовно, умови експлуатації матимуть вплив на стійкість результатів. Це пов'язано з тим, що по одній і тій же кривій ходять різні рухомі склади з різними швидкостями та з різними колесами, які можуть бути новими, зношеними або ж відновленими. Мати різні розміри, міцність та профіль, що безпосередньо впливатимуть на швидкість розвитку дефектів та фактичну площу контакту, а відповідно і зносостійкість та ресурс рейки.

Щодо недоліків роботи, то необхідно зауважити, що експериментально не розкрито раціональну концентрацію графітового порошку в оливі не лише з точки зору зносу, але й в'язкісно-температурної характеристики оливи, враховуючи її аерозольне нанесення. Саме дослідження цих нерозкритих питань становить подальшу наукову задачу.

## **7. Висновки**

1. Визначено, що формування спеціального антифрикційного покриття на робочій поверхні головки рейки шляхом додавання графітового порошку в індустріальну оливу сприяє підвищенню зносостійкості рейкової сталі. Так, при збільшенні концентрації графітового порошку в оливі від 0 до 3 % при навантаженні 363 N величина зношування зменшується на 42 %. При навантаженні 495 N величина зношування зменшується на 33,6 %, а при 646 N – на 29,7 %. Мінімальний знос, в усьому діапазоні зовнішніх навантажень, спостерігається при значенні концентрації графітового порошку 3 %.

2. Встановлено ресурс залізничної рейки в залежності від концентрації графітового порошку в індустріальній оливі за різних навантажень. Результати розра-

хунку показали, що при збільшенні концентрації графітового порошку в оливі від 0 до 3 % при навантаженні 363 N ресурс рейки збільшується в 1,51 рази. При навантаженні 495 N ресурс рейки збільшується в 1,61 рази, а при 646 N – в 1,4 рази.

### Література

1. Воробьев, А. А. (2009). Контактное взаимодействие колеса и рельса. Вестник Иркутского государственного технического университета, 3 (39), 42–47.
2. Класифікація та каталог дефектів і пошкоджень елементів стрілочних переводів та рейок залізниць України (2013). Київ: ТОВ «Інпрес», 194.
3. Voronin, S., Skoryk, O., Stefanov, V., Onoprychuk, D., Korostelov, Y. (2017). Study of the predominant defect development in rails of underground systems after preventive grinding and lubrication. MATEC Web of Conferences, 116, 03005. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711603005>
4. Voronin, S., Skoryk, O., Korostelov, Y. (2016). Determination of rational roughness of the side surface of the rail top in curved sections of the underground railway track. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (1 (82)), 11–17. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75707>
5. Блохин, Е. П., Мямлин, С. В., Сергиенко, Н. И. (2011). Повышенный износ колес и рельсов – важнейшая проблема транспорта. Залізничний транспорт України, 1, 10–14.
6. Лашко, А. Д., Савчук, О. М. (1997). К вопросу о стратегии Укрзалізници по решению проблемы сверхнормативных износов пары «колесо-рельс». Залізничний транспорт України, 2-3, 2–4.
7. Михайлов, Е. В., Семенов, С. А., Полупан, Е. В. (2017). Оценка безопасности движения по сходу с рельса колеса перспективной конструктивной схемы. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 3 (233), 120–124.
8. Савчук, О. М., Рейдемейстер, О. Г., Савченко, К. Б., Шикиунов, О. А. (2006). Алгоритм вирішення задачі контакту колеса і рейки. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 13, 131–133.
9. Voronin, S., Hrunyk, I., Stefanov, V., Volkov, O., Onoprychuk, D. (2017). Research into frictional interaction between the magnetized rolling elements. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (7 (89)), 11–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.109523>
10. Lewis, S. R., Lewis, R., Evans, G., Buckley-Johnstone, L. E. (2014). Assessment of railway curve lubricant performance using a twin-disc tester. Wear, 314 (1-2), 205–212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.033>
11. Chen, H., Fukagai, S., Sone, Y., Ban, T., Namura, A. (2014). Assessment of lubricant applied to wheel/rail interface in curves. Wear, 314 (1-2), 228–235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.12.006>
12. Descartes, S., Saulot, A., Godeau, C., Bondeux, S., Dayot, C., Berthier, Y. (2011). Wheel flange/rail gauge corner contact lubrication: Tribological investigations. Wear, 271 (1-2), 54–61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.019>

13. Nehme, G. N. (2017). Tribological behavior and wear prediction of molybdenum disulfide grease lubricated rolling bearings under variable loads and speeds via experimental and statistical approach. *Wear*, 376-377, 876–884. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.007>
14. Niu, M., Qu, J., Gu, L. (2019). Synthesis of titanium complex grease and effects of graphene on its tribological properties. *Tribology International*, 140, 105815. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.06.008>
15. Voronin, S. V., Suranov, A. V., Suranov, A. A. (2017). The effect of carbon nanoadditives on the tribological properties of industrial oils. *Journal of Friction and Wear*, 38 (5), 359–363. doi: <https://doi.org/10.3103/s1068366617050130>
16. Voronin, S., Suranov, O., Onopreichuk, D., Stefanov, V., Kryvonogov, S., Pashchenko, V. et. al. (2019). Determining the influence of carbon black in oil on the wear resistance of elements in the tribological system “steel – oil – bronze.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (12 (98)), 51–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161951>
17. Voronin, S., Hrunyk, I., Asadov, B., Onopreychuk, D., Stefanov, V. (2018). Study of the Process of Lubricant Application on the Friction Surface Using Aerosol Lubricators. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (4.3), 20–24. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19546>
18. Панченко, С. В., Воронін, С. В., Ремарчук, М. П., Асадов, Б. С. (2018). Обґрунтування вимог до мастильних матеріалів систем автоматичного змащування рейок. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 175, 6–11. doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.175.2018.127020>
19. Асадов, Б. С. (2019). Визначення технологічних параметрів рейкоз-мащувачів аерозольного типу. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 184, 108–114. doi: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.184.2019.176431>
20. Болжеларський, Я. В., Кузишин, А. Я. (2016). Порівняння методів розрахунку бокової сили від дії колеса електровоза на головку рейки. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*, 11, 55–64.
21. Демченко, В. О. (2015). Теоретичні дослідження та розрахунки сил взаємодії колії та коліс рухомого складу різного ступеню зносу. *Вісник приазовського державного технічного університету*, 2 (30), 51–63.
22. Талавіра, Г. М., Кульбовський, І. І., Демченко, В. О. (2012). Аналіз теоретичних досліджень силової взаємодії рейкової колії з колесами тягового рухомого складу. *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія*, 10, 247–253.
23. Твердомед, В. М., Возненко, А. Д., Бойко, В. Д. (2016). Розрахунок поперечних горизонтальних сил у кривих ділянках рейкової колії. *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології*, 29, 134–142.
24. Степнов, М. Н. (1985). *Статистические методы обработки результатов механических испытаний*. М.: Машиностроение, 232.

25. Винарский, М. С., Лурье, М. В. (1975). Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев: Техника, 168.
26. Panchenko, A., Voloshina, A., Panchenko, I., Titova, O., Pastushenko, A. (2019). Reliability design of rotors for orbital hydraulic motors. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 708, 012017. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012017>
27. Воронін, С. В. (2015). Розробка трибофізичних основ мастильної здатності рідкокристалічних присадок до базових олів. Східно-Європейський журнал передових технологій, 3 (7), 53–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.44389>
28. Lee, C.-G., Hwang, Y.-J., Choi, Y.-M., Lee, J.-K., Choi, C., Oh, J.-M. (2009). A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 10 (1), 85–90. doi: <https://doi.org/10.1007/s12541-009-0013-4>
29. Panchenko, A., Voloshina, A., Milaeva, I., Panchenko, I., Titova, O. (2018). The Influence of the form Error after Rotor Manufacturing on the Output Characteristics of an Orbital Hydraulic Motor. International Journal of Engineering & Technology, 7 (4.3), 1. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19542>
30. Kindrachuk, M., Radionenko, O., Kryzhanovskyi, A., Marchuk, V. (2014). The friction mechanism between surfaces with regular micro grooves under boundary lubrication. Aviation, 18 (2), 64–71. doi: <https://doi.org/10.3846/16487788.2014.926642>