DOI: https://doi.org/10.33216/2222-3428-2024-27-8
УДК 625.033: 625.031

Ковтанець М.В., Ноженко В.С., Сергієнко О.В.

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА ЗНОС ТРИБОСПОРЯДЖЕННЯ «РОЛИК-РОЛИК»

У роботі розглянуті процеси, що відбуваються у контакті колеса і рейки, що взаємодіють між собою і від яких залежить в цілому ефективність тягового рухомого складу. Встановлено, що найбільш поширеним способом досягнення високого коефіцієнта зчеплення при рушанні з місця, а також на складних ділянках профілю колії є подача сухого кварцового піску, представлені очевидні переваги даного способу та його низку істотних недоліків.

Обґрунтовано вплив електричного струму, що проходить через контакт, на його трибологічні властивості, при цьому перспектива цього способу опосередковано підтверджується даними, отриманими під час експлуатації електровозів, де встановлено, що їх граничний коефіцієнт зчеплення вище на 8% ніж у тепловозів, що імовірно пов'язано з пропусканням електричного струму через контакт колеса з рейкою. Тому для дослідження процесів, що протікають у контакті «колесо-рейка» при ходженні електричного струму необхідно провести їх детальний аналіз.

У роботі теоретично та експериментально досліджено вплив електричного струму, що проходить через контакт двох взаємодіючих роликів на їх знос при варіюванні величини сили струму та прикладеного навантаження. Теоретичні передумови впливу електричного струму на величину зносу трибосполучення були покладені в основу проведених досліджень, проведених у роботі. При моделюванні визначено вплив електричного струму з часом на зношування досліджуваних зразків. Електричний знос переважає при малих вертикальних навантаженнях, що є наслідком наявності в контактній парі незруйнованих забруднень, які мають високий перехідний опір. Зі збільшенням навантаження та руйнуванням забруднень перехідний опір падає, кількість тепла, що виділилося в контакті, зменшується, і відповідно електричне зношування знижується.

Експериментальні дослідження проведено на випробувальній машині СМЦ-2 на кафедрі залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин СНУ ім. В. Даля. Виявлено механізм впливу електричного струму на трибосполучення, що дозволяє обґрунтувати застосування даного способу для підвищення зчеплення в системі «колесо-рейка».

Ключові слова: *електричний струм, зчеплення, тепло, електричне зношування, механічне зношування.*

Актуальність дослідження. Від процесів, що відбуваються в контакті колеса і рейки, які взаємодіють між собою, залежить в цілому ефективність тягового рухомого складу [1, 2, 3]. Величина коефіцієнта тертя дуже впливає на умови взаємодії в системі «колесо-рейка» і, зрештою, на експлуатаційні витрати залізниць.

Аналізуючи існуючі способи поліпшення фрикційної взаємодії колеса з рейкою (рисунок 1) встановлено, що забезпечення стабільно високого коефіцієнта зчеплення в зоні контакту колеса з рейкою може бути досягнуто двома способами – очищенням від забруднень контактуючих поверхонь або введенням в зону контакту різних речовин (активаторів).

В даний час найбільш поширеним способом досягнення високого коефіцієнта зчеплення при рушанні з місця, а також на складних ділянках профілю колії є подача сухого піску. Очевидні переваги даного способу (простота реалізації, низька вартість), проте він має й низку істотних недоліків. В результаті застосування піску розвивається хвилеподібний знос рейок [4]. Спостерігається забруднення верхньої будови колії, запісочення баластної призми погіршує дрінуючі властивості колії, що потребує додаткових витрат на очисні роботи.

Попадання піску в стрілочний перевід веде до погіршення надійності роботи автоматики та зниження безпеки руху всього залізничного складу. Проблемою є і не висока точність подачі піску в зону фрикційного контакту, що призводить до попадання на бічну поверхню рейки і сприяє зростанню інтенсивності зносу. Як відомо, проблема підвищеного зношування коліс рухомого складу в останні два десятиліття стає все більш актуальною, що пов'язано зі збільшенням вагових норм та швидкостей руху поїздів.

Постановка проблеми. Відомі дослідження спрямовані на пошук та розробку альтернативних піску способів збільшення коефіцієнта зчеплення – використання модифікаторів тертя [5], поверхнево-активних речовин [6], активаторів тертя [6].

У роботі [7], досліджено вплив електричного струму, що проходить через контакт, на його трибологічні властивості. Перспектива цього способу опосередковано підтверджується даними, отриманими під час експлуатації електровозів. Встановлено, що їх граничний коефіцієнт зчеплення вище на 8% ніж у тепловозів, що імовірно пов'язано з пропусканням електричного струму через контакт колеса з рейкою [4]. Однак, проведений аналіз літературних джерел як у нашій країні так і за кордоном показав, що дослідження щодо визначення впливу електричного струму на зношування контактної пари «колесо-рейка» не проводилося.

Таким чином **метою статті** є визначення впливу електричного струму на фрикційні властивості контакту «колесо-рейка».

Основна частина. Для дослідження процесів, що протікають у контакті «колесо-рейка» при протіканні електричного струму необхідно провести їх детальний аналіз.

Одним з параметрів, що характеризують процес контактування колеса з рейкою є тепло, що виділяється при цьому.

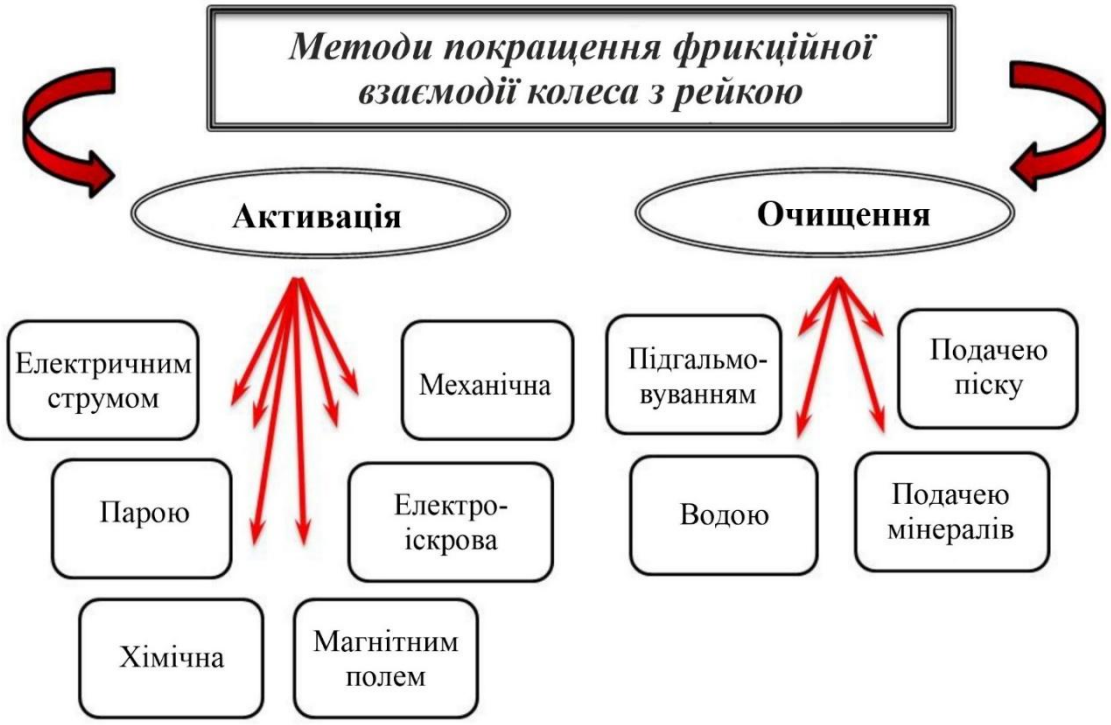

Рисунок 1 – Методи покращення фрикційної взаємодії колеса з рейкою

У трибосполученні, тепло, що виділяється при терті є результатом тертя ковзання, що призводить до механічного зносу. При пропусканні через контактну пару ще й електричного струму додатково виділяється тепло, яке також нагріває. Це пов’язано з тим, що реальний контакт колеса з рейкою реалізується не по всій поверхні сполучення, а лише в кількох точках, сумарна площа яких і є реальною поверхнею контактування, внаслідок чого при пропусканні електричного струму виникає перехідний опір або опір звуження. Протікання електричного струму через контакт, що має перехідний опір, викликає його нагрівання. В результаті нагрівання контактної зони струмові містки, що утворилися між роликами, які стикаються, оплавляються, матеріал випаровується або вигоряє. Внаслідок чого виникає електричний знос.

Таким чином, при пропусканні електричного струму в трибосполученні крім механічного зносу спостерігатися і електричний знос (рисунок 2), величина і характер якого багато в чому визначається ефективністю та перспективністю способу підвищення зчеплення.

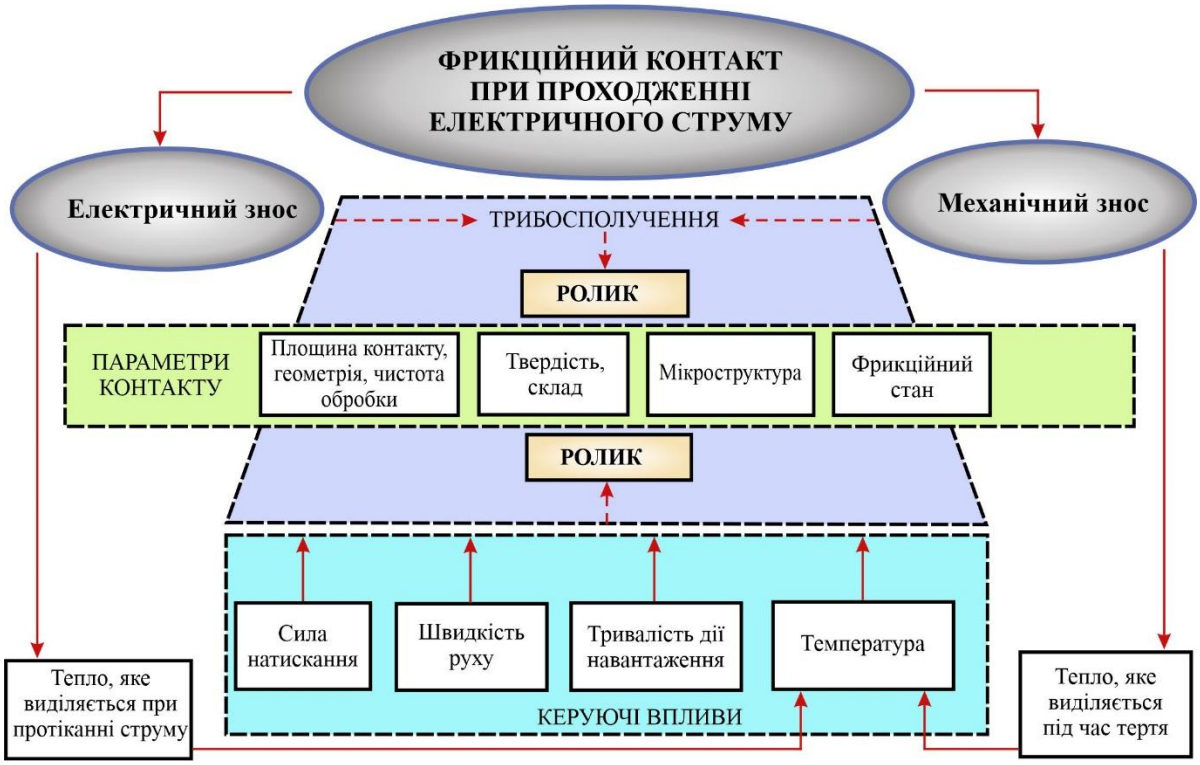

Рисунок 2 – Структурна схема процесів, що протікають у контакті при впливі електричного струму

Теоретичні передумови впливу електричного струму на величину зносу трибосполучення були покладені в основу проведених досліджень, наведених нижче.

Вихідними даними при моделюванні механічного зношування були: навантаження на зразок P, Н; радіус сферичної поверхні r, м; швидкість ковзання v, м/с; час випробування, t, с; твердість контактуючих матеріалів $H1$ та $H2$; теплопровідність матеріалу контактного елемента λ_1, Вт; питома теплоємність матеріалу c, Вт [8, 9].

Це дозволило визначити величину механічного зносу трибосполучення:

$$i_м = P \cdot \left[e^{\alpha} \cdot \left(\frac{P \cdot t \cdot c}{r^2 \cdot \lambda_1} \right)^{\beta} \cdot \left(\frac{v \cdot t}{r} \right)^{\gamma} \cdot \left(\frac{H1}{H2} \right)^{\varepsilon} \right], \quad (1)$$

де $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$ – коефіцієнти, що визначаються експериментально.

Вплив електричної складової розглядається як додатковий зовнішній параметр трибосистеми, що впливає на характеристики контакту. Загальний електричний знос визначається залежністю [10, 11]:

$$W = sP \cdot \left(W_0 + W_1 \sqrt{I/10} \right). \quad (2)$$

З урахуванням вище викладеного електричний знос дорівнює:

$$i_E = \left[\gamma Q + \frac{sP}{9.81} \cdot \left(W_0 + \frac{k1}{P^{k2}} \cdot \left(\sqrt{\frac{I}{10}} + k3 \cdot \sqrt{\frac{Q}{s}} \right) \right) \right] \cdot \rho \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

де $k1$, $k2$, $k3$ – коефіцієнти [10];

Q – кількість тепла, Дж;

P – контактне навантаження, Н;

ρ – щільність матеріалу, кг/м^3.

Результати моделювання механічного та електричного зносу представлені рисунку 3.

При моделюванні визначено вплив електричного струму з часом на зношування досліджуваних зразків (рисунок 3). Електричний знос (поверхня 2) переважає при малих вертикальних навантаженнях, що є наслідком наявності в контактній парі незруйнованих забруднень, які мають високий перехідний опір.

Зі збільшенням навантаження та руйнуванням забруднень перехідний опір падає, кількість тепла, що виділилося в контакті, зменшується, і відповідно електричне зношування знижується (рисунок 3, поверхня 2).

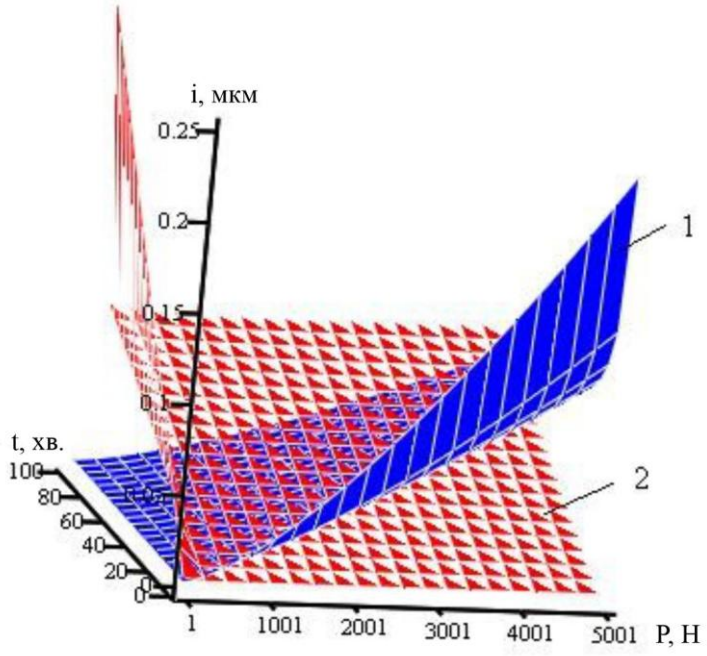

Рисунок 3 – Залежність прикладеного навантаження (P, H) та зносу (i, мкм) з часом (t, с) при проходженні електричного струму через контакт «ролик-ролик»;
1 – електричний знос (i_E), 2 – механічний знос (i_M)

Механічний знос (рисунок 3, поверхня 1) зростає зі збільшенням навантаження, що підтверджується дослідженнями у роботі [8].

Для підтвердження основних закономірностей впливу електричного струму на знос трибосполучення «ролик-ролик» проведено експериментальні дослідження на випробувальній машині СМЦ-2.

Машина моделі СМЦ-2 (рисунок 4) призначена для випробувань матеріалів на знос та визначення їх фрикційних властивостей при терті ковзанні та коченні в умовах нормальної температури в парі тертя «ролик-ролик» та додатково оснащена системою подачі електричного струму (рисунок 4), що включає:

- трансформатор ТДМ-500;
- трансформатор струму;
- амперметр.

Діапазони зміни параметрів роботи СМЦ-2 знаходились у таких межах:

- частота обертання – 300, 500, 1000 об/хв;
- коефіцієнт ковзання круглих зразків з однаковими діаметрами – 0, 5, 10, 20%;
- діапазон виміру навантаження – 0-5 кН.

В якості експериментальних зразків використовувалися ролики, виготовлені з рейкової та бандажної сталі. Верхній та нижній ролики мають зовнішній діаметр $40 \cdot 10^{-3}$ м, внутрішній діаметр $16 \cdot 10^{-3}$ м та шириною $10 \cdot 10^{-3}$ м, твердість поверхонь становить відповідно 269 НВ та 350 НВ, чистота обробки відповідає 7 класу згідно з ГОСТ 2785- 75.

Рисунок 4 – Машина випробувальна СМЦ-2 із системою подачі електричного струму:
1 – трансформатор ТДМ-500, 2 – трансформатор струму, 3 – амперметр

Метою експериментальних досліджень було визначення роботи сил тертя в контакті «ролик-ролик» при електричному струмі, що протікає через нього, за умов наближених до реального контакту «колесо-рейка».

Шлях тертя визначався за залежністю:

$$S = 2b \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1} \cdot n \cdot t,$$

де b – напівширина площини контакту:

$$b = 1{,}522 \cdot \sqrt{\frac{k_d \cdot F \cdot R_{np}}{l \cdot E_{np}}},$$

де $K_d = 1$ – динамічний коефіцієнт, для безударного циклічного навантаження;

R_{np} – наведений радіус:

$$R_{np} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 \pm r_2},$$

тут r_1 и r_2 – радіуси випробуваних зразків;

E_{np} – приведений модуль:

$$E_{np} = \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2},$$

тут E_1 та E_2 – модулі нормальної пружності випробуваних матеріалів;

V_1 та V_2 – лінійні швидкості зразків:

$$V_1 = \frac{p \cdot n}{30} \cdot \frac{D_1}{2},$$

$$V_2 = V_1 \cdot s\,,$$

тут s – коефіцієнт ковзання.

Робота тертя:

$$W = F_{mp} \cdot S\,,$$

де $F_{mp} = P \cdot f$,

P – нормальна сила;

f – коефіцієнт тертя

Час зношування зразків:

$$t = \frac{N}{n}\,,$$

де N – число циклів навантаження;

n – частота обертання зразка.

Результати серії експериментів з визначення впливу електричного струму, що пропускається через контакт «ролик-ролик» на фрикційні властивості представлені на рисунку 5.

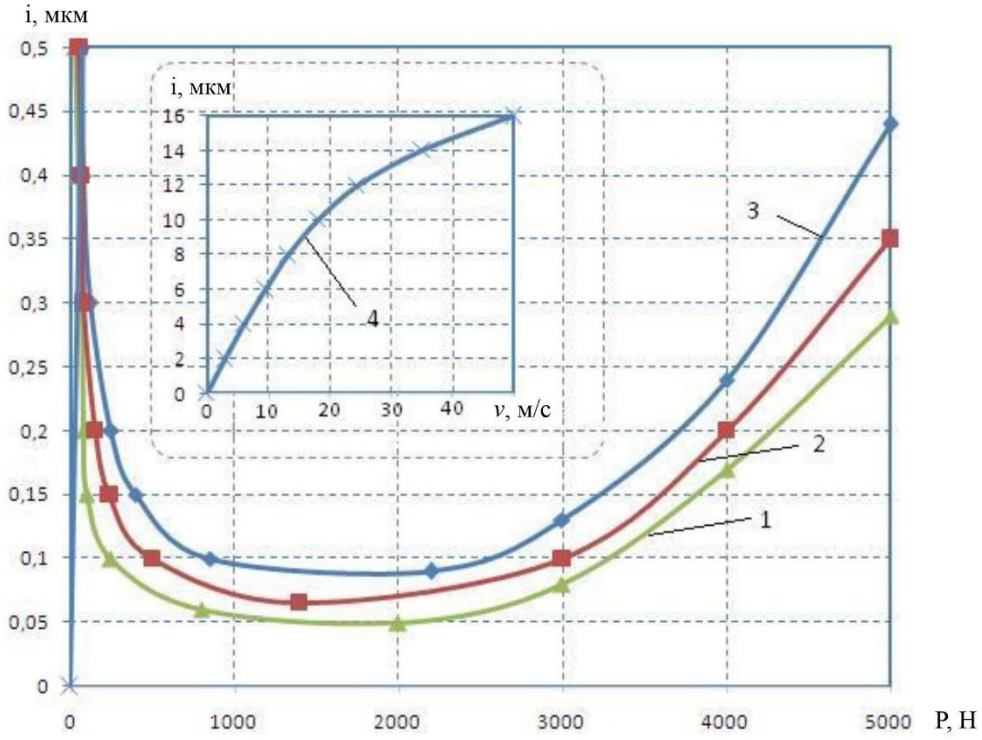

Рисунок 5 – Залежність зносу роликів від навантаження за наявності електричного струму:
1 – сила струму 100А, 2 – сила струму 200 А, 3 – сила струму 300А,
4 – знос під впливом піску [12].

Експериментальні дослідження представлені на рисунку 5 підтверджують результати моделювання, наведеного вище. На графіці представлена крива 4, яка характеризує знос поверхні деталі під впливом піску з різною швидкістю його подачі, згідно з дослідженнями [12]. При порівнянні кривих 1-3 і 4 видно, що знос від дії піску в кілька разів перевищує знос від дії електричного струму [13].

Висновок. Застосовуваний в експлуатації рухомого складу метод підвищення зчеплення шляхом подачі піску в зону контакту колеса з рейкою значно зношує поверхні, що труться, а його основні недоліки (опір руху засмічення рейко-шпальної решітки і стрілочних перекладів, що призводить до зниження безпеки руху) вимагають пошуку нових шляхів рішення.

Метод підвищення зчеплення шляхом подачі електричного струму в контакт колеса з рейкою здатний частково замінити подачу піску в парі тертя «колесо-рейка».

Механізм впливу електричного струму на трибосполучення заснований на тому, що в систему привноситься додаткове тепло, відбуваються пластичні деформації, що збільшують пляму контактування колеса

з рейкою, що сприяє підвищенню зчеплення [14, 15]. Величина зносу контактуючих поверхонь залежить від прикладеного навантаження та температури в трибосполученні.

Література

1. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1962. – 382 с.
2. Голубенко О.Л. Зчеплення колеса з рейкою: - 2-е изд. Доп. И перераб. – Луганск: Из-во ВУГУ, 1999. – 476 с.
3. Горбунов Н.И. Энергетическое воздействие двухфазного потока на зону контакта движущего колеса с рельсом – метод управления сцепными характеристиками локомотива: Монография. Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец, Т.Н. Ковтанец – Одесса: Куприенко СВ, 2019. – 181 с.
4. Nozhenko V.S. Study of resource-saving environmental methods for improving the safety of railway transport operation in tribocontacts of friction pairs: monograph / V.S. Nozhenko, M.V. Kovtanets, O.V. Serhiienko, T.M. Kovtanets. Karlsruhe, 2023. 140 p.
5. Костюкевич А.И. Экспериментальная проверка эффективности струйно-абразивного воздействия на рельсы для улучшения фрикционных свойств контакта «колесо-рельс» / А.И. Костюкевич, Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2013. – Ч.1, № 18 (207). – С. 33-37.
6. Каменев Н.Н. Эффективное использование песка для тяги поездов. Изд-во «Транспорт», 1968 – 87 с.
7. Воробьев Д.В. Улучшение фрикционных характеристик пары трения колесо-рельс за счет воздействия на контакт электрического тока и магнитного: автореф. дис. … к.т.н.: 01.02.05 / Д.В. Воробьев // Брянск, 2005. – 20 с.
8. Моделирование трения и изнашивания в машинах [Текст] / Э.Д.Браун и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
9. Гаркунов Д.Н. Триботехника [Текст]: ученик / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
10. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: Иностранная литература, 1961. – 480 с.
11. Электрический износ в паре трения токоприемник - контактный провод / ЖДМ, 2007. - №5 – С. 43-49.
12. Болдарь Л.Н. Общенаучные, теоретические и технологические основы повышения качества ремонта комбайновых и автотракторных двигателей / Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во. ЛНАУ, 2009. - №2 – С. 39-54.
13. Ноженко В.С. Управление фрикционным взаимодействием в двухточечном трибоконтакте «колесо-рельс» / В.С. Ноженко, Е.С. Ноженко, А.С. Клюев, Е.А. Гаркушин. // Вісник СНУ ім. В. Даля. - № 5(176), ч.1, 2012, - С. 103 - 108.
14. Ковтанець М.В. Вибір моделі зчеплення для моделювання динамічної поведінки локомотивів / М.В. Ковтанець, І.О. Циганoвський, О.В. Сергієнко, В.С. Ноженко, Т.М. Ковтанець // Вісник СНУ ім. В. Даля, № 5 (275), 2022. – С. 65-71.
15. Ноженко В.С. Метод управління фрикційною взаємодією у двоточковому трибоконтакті «колесо-рейка» / В.С. Ноженко, М.В. Ковтанець, Д.М. Марченко, М.М. Вакулик, Т.М. Ковтанець // Наукові вісті Далівського університету, № 25, 2023. Електронне наукове фахове видання.

References

1. Kragelskiy, I. V. Trenie i iznos / I. V. Kragelskiy. – M.: Mashinostroenie, 1962. – 382 s.
2. Golubenko O.L. Zcheplennya kolesa z reykoyu: - 2-e izd. Dop. I pererab. – Lugansk: Iz-vo VUGU, 1999. – 476 s.
3. Gorbunov N.I. Energeticheskoe vozdeystvie dvuhfaznogo potoka na zonu kontakta dvizhuschego kolesa s relsom – metod upravleniya stsepnyimi harakteristikami lokomotiva: Monografiya. N.I. Gorbunov, M.V. Kovtanets, T.N. Kovtanets – Odessa: Kuprienko SV, 2019. – 181 s.
4. Nozhenko V.S. Study of resource-saving environmental methods for improving the safety of railway transport operation in tribocontacts of friction pairs: monograph / V.S. Nozhenko, M.V. Kovtanets, O.V. Serhiienko, T.M. Kovtanets. Karlsruhe, 2023. 140 p.
5. Kostyukevich A.I. Eksperimentalnaya proverka effektivnosti struyno-abrazivnogo vozdeystviya na relsyi dlya uluchsheniya friktsionnyih svoystv kontakta «koleso-rels» / A.I. Kostyukevich, N.I. Gorbunov, M.V. Kovtanets // VIsnik SNU Im. V. Dalya. – 2013. – Ch.1, № 18 (207). – S. 33-37.
6. Kamenev N.N. Effektivnoe ispolzovanie peska dlya tyagi poezdov. Izd-vo «Transport», 1968 – 87 s.
7. Vorobev D.V. Uluchshenie friktsionnyih harakteristik paryi treniya koleso-rels za schet vozdeystviya na kontakt elektricheskogo toka i magnitnogo: avtoref. dis. … k.t.n.: 01.02.05 / D.V. Vorobev // Bryansk, 2005. – 20 s.
8. Modelirovanie treniya i iznashivaniya v mashinah [Tekst] / E.D.Braun i dr. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 191 s.
9. Garkunov D.N. Tribotehnika [Tekst]: uchenik / D.N. Garkunov. – M.: Mashinostroenie, 1989. – 328 s.
10. Holm, R. Elektricheskie kontaktyi [Tekst] / R. Holm. – M.: Inostrannaya literatura, 1961. – 480 s.
11. Elektricheskiy iznos v pare treniya tokopriemnik - kontaktnyiy provod / ZhDM, 2007. - №5 – S. 43-49.
12. Boldar L.N. Obschenauchnyie, teoreticheskie i tehnologicheskie osnovyi povyisheniya kachestva remonta kombaynovyih i avtotraktornyih dvigateley / Naukoviy vIsnik Luganskogo natsIonalnogo agrarnogo unIversitetutu. SerIya: TehnIchnI nauki. – Lugansk: Vid-vo. LNAU, 2009. - №2 – S. 39-54.
13. Nozhenko V.S. Upravlenie friktsionnyim vzaimodeystviem v dvuhtochechnom tribokontakte «koleso-rels» / V.S. Nozhenko, E.S. Nozhenko, A.S. Klyuev, E.A. Garkushin. // VIsnik SNU Im. V. Dalya. - № 5(176), ch.1, 2012, - S. 103 - 108.
14. Kovtanets M.V. VibIr modelI zcheplennya dlya modelyuvannya dinamIchnoYi povedInki lokomotivIv / M.V. Kovtanets, I.O. Tsiganovskiy, O.V. SergIEnko, V.S. Nozhenko, T.M. Kovtanets // VIsnik SNU Im. V. Dalya, № 5 (275), 2022. – S. 65-71.
15. Nozhenko V.S. Metod upravlInnya friktsIynoyu vzaEmodIEyu u dvotochkovomu tribokontaktI «koleso-reyka» / V.S. Nozhenko, M.V. Kovtanets, D.M. Marchenko, M.M. Vakulik, T.M. Kovtanets // NaukovI vIstI DalIvskogo unIversitetu, № 25, 2023. Elektronne naukove fahove vidannya.

The work *considers the processes occurring in the contact of the wheel and the rail, which interact with each other and on which the overall efficiency of the traction rolling stock depends. It is established that the most common way to achieve a high coefficient of adhesion when starting from a standstill, as well as on complex sections of the track profile, is the supply of dry quartz sand, the obvious advantages of this method and a number of its significant disadvantages are presented.*

The influence of the electric current passing through the contact on its tribological properties is substantiated, while the prospect of this method is indirectly confirmed by data obtained during the operation of electric locomotives, where it was established that their limiting coefficient of adhesion is 8% higher than that of diesel locomotives, which is presumably due to the passage of electric current through the contact of the wheel with the rail. Therefore, to study the processes occurring in the contact «wheel-rail» when electric current flows, it is necessary to conduct their detailed analysis.

The work theoretically and experimentally investigated the effect of electric current passing through the contact of two interacting rollers on their wear when varying the magnitude of the current strength and the applied load. The theoretical prerequisites for the effect of electric current on the wear of the tribocoupling were laid down as the basis for the studies conducted in the work. The modeling determined the effect of electric current over time on the wear of the samples under study. Electrical wear prevails at low vertical loads, which is a consequence of the presence of unbroken contaminants in the contact pair, which have high contact resistance. With increasing load and destruction of contaminants, the contact resistance decreases, the amount of heat released in the contact decreases, and accordingly, electrical wear decreases.

Experimental studies were conducted on the SMC-2 test machine at the Department of Railway, Road Transport and Lifting and Transport Machines of the V. Dahl State University. The mechanism of the influence of electric current on tribocoupling has been identified, which allows us to justify the use of this method to increase adhesion in the wheel-rail system.

Keywords: *electric current, adhesion, heat, electrical wear, mechanical wear.*

Ковтанець М. В. – доцент кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машин Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; kovtanetsm@gmail.com

Ноженко В.С. – проректор з навчальної роботи Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського; vladymyrnozhenko@gmail.com

Сергієнко О. В. – доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля; sergienko.o.v@gmail.com