

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.336

Д. В. УСТИМЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОБОТИ ЗМАЩУВАЛЬНИХ ШАРІВ У ТРИБОСИСТЕМІ «КОНТАКТНИЙ ПРОВІД – КОНТАКТНА ВСТАВКА СТРУМОПРИЙМАЧА»

Мета. Головною метою роботи є всебічний аналіз процесів, що відбуваються в змащувальних шарах поверхонь тертя трибосистеми «контактний провід – контактна вставка струмоприймача» (КПКВС) та виявлення особливостей, характерних для систем цього класу. **Методика.** Для вивчення фізико-технологічних аспектів роботи змащувальних шарів у трибосистемі «контактний провід – контактна вставка струмоприймача» в якості основної методології застосовується системний аналіз. **Результати.** Теорія електрофрикційної взаємодії зараз перебуває на такому етапі, який характеризується великою кількістю нагромаджених емпіричних даних, гіпотез і моделей, котрі не можуть адекватно представити явища в ковзному сильнострумовому електричному контакті. Ковзний електричний контакт трибосистеми «контактний провід – контактна вставка струмоприймача» під час експлуатації піддається впливу багатьох факторів, одним із яких є процеси в змащувальних шарах пари тертя. Розуміння особливостей процесів, що протікають в змащувальних шарах, та їх впливу на роботу ковзного сильнострумового електричного контакту може стати запорукою забезпечення суттєвого підвищення працездатності таких систем і, як наслідок, суттєво підвищити надійність і безпеку роботи електрорухомого складу. **Наукова новизна.** Пропонується розглядати процеси електрофрикційної взаємодії електричних контактів з позиції синергетики, застосовуючи теорію фракталів в якості базової для кількісного опису структур, що самоорганізуються. **Практична значимість.** Урахування емпіричного досвіду експлуатації трибосистеми «контактний провід – контактна вставка струмоприймача» в поєднанні з теоретичними знаннями дозволяє запропонувати три можливих напрямки вирішення трибологічних проблем у сильнострумових ковзних електричних контактах. А саме: 1) зміну геометрії контакту й топографії поверхонь, наприклад, використання регулярного макрорельєфу поверхонь контакту; 2) розробку електропровідних композитів, для яких характерне самозмащування, наприклад, використання композиційних матеріалів, що містять тверді електропровідні мастила; 3) розробку ефективних мастил для електричних сильнострумових ковзних контактів, що може потребувати деякого ускладнення конструкції вузла.

Ключові слова: контактна пара; струмознімання; контактний провід; інтенсивність зношування; граничне тертя; перехідний опір контакту; контактна вставка струмоприймача

Вступ

На систему «струмоприймач – контактний провід» покладена важлива задача передачі енергії з електромережі на транспортний засіб. Отже, надійний електричний контакт між струмоприймачем і контактним проводом безпосередньо пов'язаний з надійністю роботи й безпекою руху поїздів. У процесі експлуатації ко-

тактний провід і контактна вставка струмоприймача піддаються багаторазовому тертю ковзання, нагріванню, ерозії тощо, що робить еволюцію контакту досить складною. Важливу роль у роботі ковзного контакту відіграє мащення поверхонь тертя.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Мета

Головною метою роботи є всебічний аналіз процесів у змащувальних шарах поверхонь тертя трибосистеми «контактний провід – контактна вставка струмоприймача» (КПКВС) та виявлення особливостей, характерних для таких систем.

Дослідження, направлені на визначення особливостей процесів, що відбуваються в змащувальних шарах поверхонь тертя трибосистеми КПКВС, слід віднести до актуальних у науковому й практичному плані, оскільки врахування цих особливостей може забезпечити суттєве підвищення працездатності трибосистем цього класу [3, 4, 14, 15].

Методика

Для досягнення поставленої в роботі мети передбачається вивчення фізико-технічних аспектів роботи змащувальних шарів у трибосистемі «контактний провід – контактна вставка струмоприймача». В якості основної методології застосовується системний метод.

Результати

Теорія тертя й зношування поверхневих шарів в умовах граничного змащування вивчалась у роботах Костецького Б. І. [7], Боудена Ф. П. і Тейбора Д. [5], Крагельського І. В. [8], Ахматова О. С. [2], Чічінадзе А. В. [13].

Відомо, що робота ковзних контактів тісно пов'язана з тертям і зношенням. Тому потрібно розглядати не тільки електричні властивості ковзних контактів, але й явища тертя та зношування. Якщо дві очищені поверхні приведені в контакт на міжатомній відстані, то між ними діють такі ж сили тяжіння, що і в об'ємі матеріалу. Можна виділити декілька типів таких сил:

- іонний зв'язок виникає між аніонами й катіонами, що утримуються електростатичними силами;
- ковалентний (гомополярний) зв'язок між нейтральними атомами здійснюється за допомогою перекриття їх електронних полів, що призводить до виникнення сильного зв'язку;
- металічний зв'язок характерний для всіх металів і обумовлений наявністю електронів, що вільно рухаються між вузлами іонної решітки;

– вандервальсовий зв'язок може виникати між будь-якими атомами чи молекулами за рахунок диполь-дипольної взаємодії.

Кожний атом в об'ємі матеріалу взаємодіє зі своїми найближчими сусідами за допомогою вказаних вище сил. Питома енергія, яка пов'язана з цією взаємодією, називається енергією когезії, вона відіграє важливу роль у процесах тертя і зношування. Атоми на поверхні мають меншу кількість сусідів, відповідно вони не мають зв'язків за межами тіла (рис. 1) [10]. З цієї причини поверхня твердого тіла має деяку збиткову енергію, яка обумовлює здатність поверхні до формування адгезійних з'єднань.

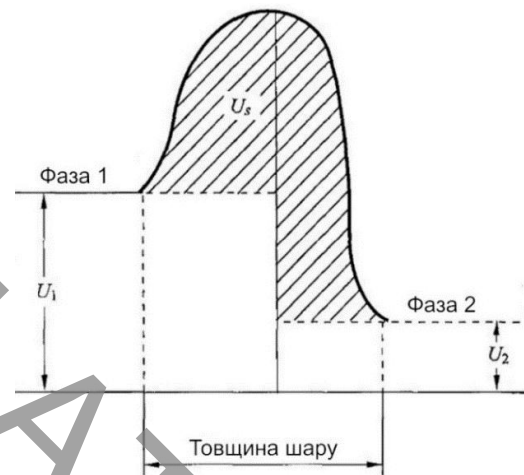


Рис. 1. Енергія міжфазного шару U_s під час контактування фаз 1 та 2, що володіють поверхневою енергією U_1 та U_2 (за Кашевим)

Наявність поверхневої енергії обумовлює взаємодію поверхні з навколишнім середовищем (у тому числі й з мастильними матеріалами) – адсорбцію, яка призводить до формування граничних шарів. У результаті адсорбції на поверхні завжди знаходяться елементи сусідніх фаз.

Для фізичної адсорбції характерною є вандервальсова взаємодія адсорбату з поверхнею тіла. Сформовані на поверхні полімолекулярні адсорбційні шари порівняно легко видаляються.

У процесі хімічної адсорбції енергія взаємодії достатньо велика, і на поверхні зазвичай формується моношар, який складно видаляється.

Таким чином, адсорбційна активність поверхонь приводить до того, що на них утворюється тонкий граничний шар, який відрізняється за

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

структурою і властивостями від поверхневого (перехідного) шару твердого тіла. Фізичний стан речовини такого граничного шару може бути різним і залежить як від параметрів стану (температури, тиску і т. ін.), так і від характеру взаємодії з твердою фазою.

Адгезія поверхонь, що труться, багато в чому визначає закономірності тертя і зношування. Поверхневі шари в процесі тертя зазнають різних змін, ці зміни можуть носити як зворотний, так і незворотний характер, бути причиною зношування, схоплювання й інших явищ.

Першоджерело цих процесів, а в ряді випадків основна причина – напружено-деформований і тепловий стан фрикційного контакту.

Тертя в умовах граничного змащування супроводжується формуванням між робочими поверхнями тонкого шару мастила, що набуває властивостей «третього тіла» (за Крагельським І. В. [5, 8]).

За ДСТУ 2823-94, термін «граничне тертя» тлумачиться як «мащення, в умовах якого тертя та зношування поверхонь, що рухаються одна відносно одної, визначаються їх властивостями, а також тими властивостями мастильного матеріалу, які відрізняються від об'ємної в'язкості мастильного матеріалу».

Термін «змащувальні шари» мастильних матеріалів досі не має однозначного тлумачення в межах ДСТУ, але в узагальненому вигляді трактується так: змащувальні шари мастильних матеріалів на твердих ліофільних поверхнях – це «квазікристалічні молекулярні шари з мультимолекулярною епітропнорідкокристалічною структурою» [1].

Мастильний матеріал у граничному шарі анізотропний, тому молекулярні шари в тангенціальному напрямку ковзають один відносно одного. У нормальному напрямку до поверхні тертя несна здатність граничного шару висока, і деформація її стискання знаходиться в межах пружності.

Тертя за напіврідкого мащення виникає у випадку одночасної дії рідкого й граничного мастила. Нормальне навантаження врівноважується опором стисканню плівки мастильного матеріалу в плямах контакту і силами гідродинамічного тиску в шарах мастила. Частка реакції граничного чи рідкого мастила залежить від навантаження, швидкості взаємного ковзання

поверхонь, стану поверхонь, а також від кількості й в'язкості мастильного матеріалу. Гідродинамічна дія мастила проявляється в разі його потрапляння в макрогеометричні зазори між поверхнями тертя.

На сьогодні детально розглянуто широке коло моделей трибологічних систем (тертя без передачі електричного струму) й розроблена система показників контактної взаємодії, а також методів їх визначення. Уведено геометричні характеристики поверхонь – макровідхилення, хвилястість, шорсткість, субмікрошорсткість; характеристики площ торкання – видима, контурна, фактична; типи контактів – пружний, пружно-пластичний, пластичний і т. д. [13].

У парі тертя КПКВС з металу виготовлено один із контактних елементів (контактний провід), в якості основного матеріалу другого контактного елемента (контактна вставка струмоприймача) використовують твердозмащувальні електропровідні композиції чотирьох основних типів: металографітні, графітні, вугільнографітні та електрографітні. Для таких композицій характерним є утворення під час тертя перенесених плівок на металічному контртілі.

Експериментальні дослідження показали, що товщина, склад і структура перенесених плівок пов'язані з зовнішніми параметрами ковзного контакту (навантаження, швидкість), складом композиту, контртіла і навколишнього середовища [11]. У той же час плівка визначає механізм проходження струму, а відповідно, й електричні характеристики контакту, характер та інтенсивність тепловиділення. Товщина плівки і ступінь покриття нерівності металічного контртіла є з цієї точки зору найбільш важливими факторами її впливу, що проілюстровано на рис. 2.

Електричний струм може розглядатись як додатковий зовнішній параметр трибосистеми, що впливає на всі характеристики ковзного контакту. Цей вплив у багатьох випадках настільки значний, що спеціально введено поняття «змащувальної дії» електричного струму (зниження сили тертя у разі збільшення густини струму) й «електричного» зношування (надлишкове зношування елементів ковзного контакту порівняно з так званим механічним зносом за відсутності струму).

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

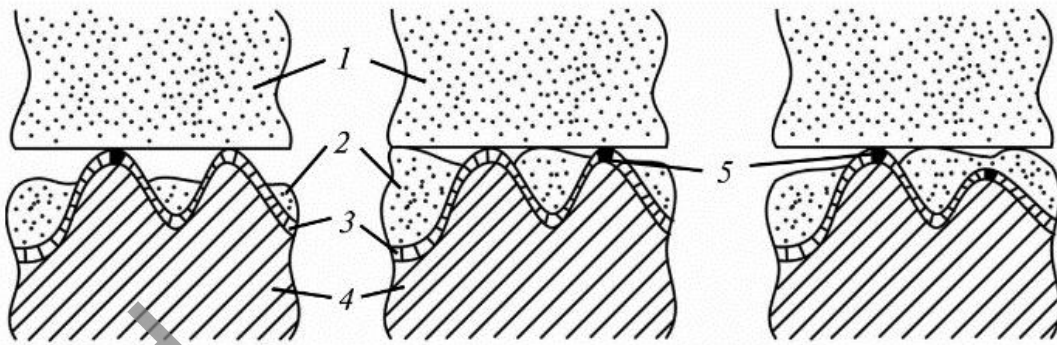


Рис. 2. Моделі перехідного шару на поверхні металу, що окиснюється під час роботи в парі з контактним матеріалом із здатністю самозмащуватись:

1 – контактний матеріал із здатністю самозмащуватись; 2 – перенесений матеріал; 3 – плівка окиснів; 4 – метал; 5 – ділянки з тунельно-провідною чи зруйнованою окисною плівкою

У вугільно-графітових та електрографітових накладках підвищення густини струму, який проходить через контакт, унаслідок тепловідведення знижує міцність поверхнього шару і його опір зсуву, що викликає ефект, аналогічний введенню в контакт змащувального матеріалу. Такий ефект є зворотним.

Для графітових щіток, які мають відносно високий (до 25 % масової частини) вміст некарбонізованого (полімерного) сполучного матеріалу, «ефект змащування», вищий за деяку критичну густину струму, проявляється незворотно і виражається досить різко, оскільки тепловідведення стає причиною руйнування сполучного матеріалу й композиції.

Під час застосування металографітових матеріалів із високим вмістом металу (масова частка – до 90 %) вплив густини струму на коефіцієнт тертя практично не проявляється, і тільки за високої густини струму (більше ніж 20 А/см^2) коефіцієнт тертя дещо зростає. У таких матеріалів кількість перенесеного матеріалу на поверхні контртіла незначна, і фрикційна поведінка таких композицій близька до поведінки металів.

Досить важко прогнозувати інтенсивність зношування контакту за величиною густини струму через різноманіття факторів дії струму й складного характеру їх взаємозв'язку. Серед основних факторів зношування за відсутності електричного іскріння й дугоутворення можна виділити такі: окиснення металічного елемента пари тертя; зростання адгезії внаслідок дисоціації плівок води чи органічних речовин під ді-

єю струму; окиснення композиційного елемента пари тертя й послаблення його міцності; виникнення ударних термічних напруг у динамічному контакті через нерівномірність розподілу густини струму в ньому [11, 12, 9]. Усі фактори можуть діяти одночасно, і їх головною першопричиною є виділення теплоти на перехідному контактному опорі. У випадку виникнення іскріння чи дугоутворення до перелічених факторів додаються електроерозія й викиди матеріалу контакту в дуговому розряді, які підвищують інтенсивність зношення.

У контакті загальна поверхня розділу розпадається на безліч окремих плям. У зв'язку з цим під час проходження потоку енергії через таку поверхню додається додатковий опір, внесений порушенням однорідності ліній потоку, – опір стягування. До нього в загальному випадку додається опір плівок, які мають наступні різновиди: адгезійні плівки, пасивальні плівки, плівки потьмарення (оксидні, сульфідні), водні плівки, плівки від продуктів зношення [6].

Кожному масштабу неоднорідності контактної зони відповідає компонента загального опору стягування [6]. Хольм запропонував враховувати дві компоненти, що відповідають стягуванню до групи плям і стягуванню в межах даної групи. Для тіл з однаковим питомим опором ρ , які мають одну групу круглих, рівномірно розподілених плям, отримано вираз:

$$R_c = R_1 + R_2 = \rho \cdot \left(\frac{1}{2na} + \frac{1}{2a_k} \right), \quad (1)$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

де n – загальна кількість плям контакту; a – радіус плями; a_k – радіус кола, в середині якого розміщуються плями контакту; R_1, R_2 – компоненти опору, які відповідають стягуванню до плям і їх груп.

Грінвуд [16] уточнив другий член виразу (1):

$$R_c = R_1 + R_2 = \rho \cdot \left(\frac{1}{2na} + \frac{16}{3\pi^2 a_k} \right), \quad (2)$$

де показано, що його величина практично однакова для будь-якого розміщення контактних плям у загальній групі.

Формула Грінвуда також була розширена членами, які враховують асиметрію розподілу груп плям одна на одну, а також розподіл груп на номінальній площі [18].

У процесі струмознімання нагрівається контактний провід і контактний елемент, при цьому важливе значення має співвідношення між енергіями втрат (A_v) і теплорозсіювання ($A_{тр}$), що віддається в навколишнє середовище. За певного граничного значення $\Delta A = A_v - A_{тр}$, створюються передумови, що призводять до пластичної деформації контактних поверхонь із наступним плавленням.

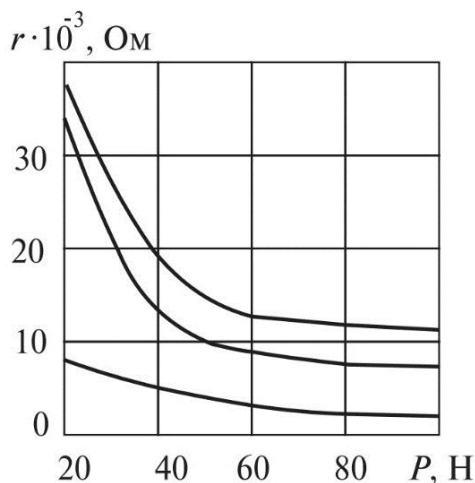


Рис. 3. Залежність перехідного опору від сили натискання для різних матеріалів

Одним із основних показників якості електричного контакту є спад напруги ΔU на ньому:

$$\Delta U = I \cdot r, \quad (3)$$

де I – струм через контакти, r – перехідний опір контактної пари.

Безумовно, на величину перехідного опору контактної пари КПКВС впливає контактне натискання, зміна контактного натискання навіть у допустимих межах супроводжується зміною перехідного опору, що ілюструють залежності на рис. 3 [11].

Збільшення перехідного опору контактної пари за тієї чи іншої причини призводить до зростання ΔA .

Збільшення площі фактичного контакту в парі тертя сприяє зменшенню перехідного опору r . Таким чином, використовуючи дані про співвідношення контактної провідності і топографії, можна надати рекомендації щодо конструювання контактів, наприклад, використання регулярного макрорельєфу поверхонь контакту.

Для підвищення надійності роботи ковзних контактів і збільшення їх ресурсу використовуються декілька методів. Загальним для них є використання контактних матеріалів із тонким перехідним шаром, наприклад, використання композицій, що містять тверді електропровідні мастильні матеріали. Проблема розробки мастил для ковзних контактів із відносно високими швидкостями на даний час не вирішена.

Теорія електрофрикційної взаємодії зараз перебуває на такому етапі, який характеризується великою кількістю нагромаджених емпіричних даних, гіпотез і різного роду моделей, які не можуть адекватно представити явища, що вивчаються. На сьогодні швидко розвивається теорія самоорганізованих систем – синергетика і теорія фракталів – самоподібних еволюційних структур, які не описуються в рамках евклідової геометрії.

Синергетика вивчає процеси самоорганізації, стійкості й розпаду структур різного походження, що формуються у відкритих системах, упорядкований стан яких пов'язаний з узгодженою поведінкою підсистем. Це призводить до формування організованих структур у результаті обміну енергією й речовиною з навколишнім середовищем, коли встановлюється рівновага між продукуванням і скороченням ентропії. Теорія фракталів виявилася базою для кількісного опису структур, що самоорганізуються [17, 19].

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Наукова новизна та практична значимість

Із проблеми механізму передачі електричного струму через ковзний контакт до цього часу немає єдиної точки зору.

Якісний розвиток теорії електричних контактів може сприяти розгляду процесів електрофрикційної взаємодії з позиції синергетики й теорії фракталів, оскільки ковзний електричний контакт є відкритою системою, а в перехідному шарі протікають еволюційні процеси виникнення і розпаду провідникових кластерів.

У технологічному аспекті можна виділити три основні напрямки вирішення трибологічних проблем в електричних контактах: зміна геометрії контакту й топографії поверхонь; ро-

зробка електропровідних композитів, для яких характерне самозмасування; розробка ефективних мастил для електричних контактів.

Висновки

Робота виводить на новий рівень розуміння особливостей процесів, що протікають в змащувальних шарах, та їх впливу на роботу ковзного електричного контакту.

Розгляд процесів електрофрикційної взаємодії ковзних контактів із позиції синергетики, де теорія фракталів є базою для кількісного опису структур, сприятиме якісному розвитку теорії електричних контактів, що в практичному аспекті може стати запорукою забезпечення суттєвого підвищення працездатності таких систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алтоиз, Б. А. Структурированные приповерхностные слои нормальных алканов / Б. А. Алтоиз, С. В. Кириян // Инженерно-физ. журн. – 2010. – Т. 83, № 3. – С. 608–613.
2. Ахматов, А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – Москва : Физ-матгиз, 1963. – 472 с.
3. Большаков, Ю. Л. Дослідження властивостей струмознімальних елементів та їх впливу на ефективність роботи трибосистеми «контактний провід – вугільна вставка» / Ю. Л. Большаков, А. В. Антонов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 6 (60). – С. 35–44. doi: 10.15802/stp2015/57006
4. Большаков, Ю. Л. Підвищення ресурсу вугільних струмознімальних вставок струмоприймачів швидкісного електрорухомого складу в умовах експлуатації / Ю. Л. Большаков, А. В. Антонов // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 4 (58). – С. 57–70. doi: 10.15802/stp2015/49205
5. Боуден, Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – Москва : Машиностроение, 1968. – 543 с.
6. Кончиц, В. В. Триботехника электрических контактов / В. В. Кончиц, В. В. Мешков, В. В. Мышкин ; под ред. В. А. Белого. – Минск : Наука и техника, 1986. – 256 с.
7. Костецкий, Б. И. Износостойкость деталей машин / Б. И. Костецкий. – Киев : Машгиз, 1950. – 168 с.
8. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – Москва : Машиностроение, 1977. – 526 с.
9. Методология комплексной оценки эксплуатационных качеств накладок токоприемников электроподвижного состава / В. Л. Горобец, Н. А. Бабяк, А. Ярмач, А. М. Бондарев // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2015. – № 1 (218). – С. 297–302.
10. Мышкин, Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – Москва : Физматлит, 2007. – 368 с.
11. Сидоров, О. А. Исследование и прогнозирование износа контактных пар систем токосъема с жестким токопроводом : монография / О. А. Сидоров, С. А. Ступаков. – Москва : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 174 с.
12. Сидоров, О. А. К вопросу о прогнозировании износа элементов контактных пар устройств токосъема электроподвижного состава / О. А. Сидоров, В. М. Филиппов // Междунар. журн. приклад. и фундамент. исследований. – 2015. – № 12-8. – С. 1393–1397.
13. Справочник по триботехнике : в 3 т. / под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1989. – Т. 1: Теоретические основы. – 400 с.
14. Устименко, Д. В. Сучасний стан проблеми струмознімання на електрифікованих залізницях / Д. В. Устименко // Електрифікація транспорту. – 2016. – № 12. – С. 71–75.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

15. Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system / Guangning Wu, Wenfu Wei, Guoqiang Gao, Jie Wu, Yue Zhou // Journal of Modern Transportation. – 2016. – Vol. 24. – Iss. 2. – P. 132–138. doi: 10.1007/s40534-016-0099-1
16. Greenwood, J. A. Constriction resistance and the real area of contact / J. A. Greenwood // British Journal of Applied Physics. – 1966. – Vol. 17. – Iss. 12. – P. 1621–1631. doi: 10.1088/0508-3443/17/12/310
17. Janahmadov, A. K. Synergetics and Fractals in Tribology / Ahad Kh Janahmadov, Maksim Y Javadov. – Cham : Springer, 2016. – 381 p. doi: 10.1007/978-3-319-28189-6
18. Jeng, D. R. Thermal Contact Resistance in Vacuum / D. R. Jeng // Journal of Heat Transfer. – 1967. – Vol. 89. – Iss. 3. – P. 275–276. doi: 10.1115/1.3614382
19. The Synergetic Effects of Surface Texturing and MoDDP Additive Applied to Ball-on-Disk Friction Subject to Both Flooded and Starved Lubrication Conditions / Linqing Bai, Yonggang Meng, Zulfiqar Ahmad Khan, Varian Zhang // Tribology Letters. – 2017. – Vol. 65. – Iss. 4. – P. 115–127. doi: 10.1007/s11249-017-0949-y

Д. В. УСТИМЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ СМАЗОЧНЫХ СЛОЕВ В ТРИБОСИСТЕМЕ «КОНТАКТНЫЙ ПРОВОД – КОНТАКТНАЯ ВСТАВКА ТОКОПРИЕМНИКА»

Цель. Главной целью работы является всесторонний анализ процессов, происходящих в смазочных слоях поверхностей трения трибосистемы «контактный провод – контактная вставка токоприемника» (КПКВТ) и выявление особенностей, характерных для систем этого класса. **Методика.** При изучении физико-технологических аспектов работы смазочных слоев трибосистемы «контактный провод – контактная вставка токоприемника» в качестве основной методологии применяется системный анализ. **Результаты.** Теория электрофрикционного взаимодействия сейчас находится на этапе, характеризуемом большим количеством накопленных эмпирических данных, гипотез и моделей, которые не могут адекватно представить явления в скользящем сильноточном электрическом контакте. Скользящий электрический контакт трибосистемы «контактный провод – контактная вставка токоприемника» в процессе эксплуатации подвергается воздействию многих факторов, одним из которых являются процессы в смазочных слоях пары трения. Понимание особенностей процессов, протекающих в смазочных слоях и их влияния на работу скользящего сильноточного электрического контакта, может стать залогом обеспечения существенного повышения работоспособности таких систем и, как следствие, существенно повысить надежность и безопасность работы электроподвижного состава. **Научная новизна.** Предлагается рассматривать процессы электрофрикционного взаимодействия электрических контактов с позиции синергетики, применяя теорию фракталов в качестве базовой для количественного описания самоорганизующихся структур. **Практическая значимость.** Учет эмпирического опыта эксплуатации трибосистемы «контактный провод – контактная вставка токоприемника» в сочетании с теоретическими знаниями позволяет предложить три возможных направления решения трибологических проблем в сильноточных скользящих электрических контактах. А именно: 1) изменение геометрии контакта и топографии поверхностей, например, использование регулярного макрорельефа поверхностей контакта; 2) разработка электропроводящих композитов для которых характерно самосмазывание, например, использование композиционных материалов, содержащих твердые электропроводящие смазки; 3) разработка эффективных смазок для электрических сильноточных скользящих контактов, что может потребовать некоторого усложнения конструкции узла.

Ключевые слова: контактная пара; токосъем; контактный провод; интенсивность износа; предельное трение; переходное сопротивление контакта; контактная вставка токоприемника

D. V. USTYMENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

PHYSICO-TECHNOLOGICAL ASPECTS OF WORK OF LUBRICANT FILMS IN THE TRIBOSYSTEM «OVERHEAD LINE – CURRENT COLLECTOR CONTACT STRIP»

Purpose. The article aimed at comprehensive analysis of the processes occurring in the lubricant films of the friction surfaces of the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» (OLCCCS) and identification of the features of such systems. **Methodology.** The systematic analysis was used as the main methodology for studying the physico-technological aspects of work of the lubricant films in the tribosystem «overhead line – current collector contact strip». **Findings.** The theory of electro-friction interaction is now at such a stage that is characterized by a large amount of accumulated empirical data, hypotheses and models that cannot adequately represent phenomena in a sliding, high-current electrical contact. The sliding electrical contact of the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» during the operation is affected by many factors, one of which is the processes in the lubricating layers of the friction pair. The work leads to a new level of understanding of the peculiarities of the processes occurring in the lubricating layers and their effect on the work of a sliding, high-current electrical contact, which can become the guarantee of significant increase in the efficiency of such systems and, as a consequence, substantially increase the reliability and safety of the work of the electric stock. **Originality.** It is proposed to consider the processes of electro-friction interaction of electrical contacts from the position of synergy using the theory of fractals as the core one for the quantitative description of self-organizing structures. **Practical value.** Taking into account the empirical experience of operation of the tribosystem «overhead line – current collector contact strip» in combination with theoretical knowledge allows us to propose three possible directions for solving tribological problems in high-current sliding electrical contacts. They are: 1) change in contact geometry and surface topography, for example, the use of regular macrorelief of contact surfaces; 2) development of conductive composites which are characterised with self-lubrication, for example the use of composite materials containing solid conductive lubricants; 3) development of effective lubricants for electric high-current sliding contacts, which may require some complication of the component design.

Keywords: contact pair; current collection; overhead line; wear rate; limit friction; contact transient resistance; current collector contact strip

REFERENCES

1. Altoiz, B. A., & Kiriyana, S. V. (2010). Strukturirovannye pripoverkhnostnyye sloi normalnykh alkanov. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* 83(3), 608-613. (in Russian)
2. Akhmatov, A. S. (1963). *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya*. Moscow: Fizmatgiz. (in Russian)
3. Bolshakov, Y. L., & Antonov, A. V. (2015). Investigation of properties of current collector elements and their effect on the performance of tribosystem «contact wire–current collector element». *Science and Transport Progress*, 6(60), 35-44. doi: 10.15802/stp2015/57006 (in Ukrainian)
4. Bolshakov, Y. L., & Antonov, A. V. (2015). Increase the resource of current collector elements of the electrified high-speed transport in operating conditions. *Science and Transport Progress*, 4(58), 57-70. doi: 10.15802/stp2015/49205 (in Ukrainian)
5. Bouden F. P., & Teybor, D. (1968). *The friction and lubrication of solids*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
6. Konchits, V. V., Meshkov, V. V., & Myshkin, V. V. (1986) *Tribotekhnika elektricheskikh kontaktov*. Minsk: Nauka i tekhnika. (in Russian)
7. Kostetskiy, B. I. (1950). *Iznosostoykost detaley mashin*. Kiev: Mashgiz. (in Russian)
8. Kragelskiy, I. V., Dobychn, M. N., & Kombalov, V. S. (1977). *Osnovy raschetov na trenie i iznos*. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

9. Horobets, V. L., Babyak, N. A., Yarmak, A. I., & Bondarev, A. M. (2015). Methodology of complex estimation of operating qualities of electric loco current collectors shin. *Visnik of the Volodymyr Dahl east ukrainian national university*, 1(218), 297-302. (in Russian)
10. Myshkin, N. K., & Petrokovets, M. I. (2007). *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii*. Moscow: Fizmatlit. (in Russian)
11. Sidorov, O. A., & Stupakov, S. A. (2012). *Issledovanie i prognozirovanie iznosa kontaknykh par sistem tokosema s zhestkim tokoprovodom: monografiya*. Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte». (in Russian)
12. Sidorov, O. A., & Philippov, V. M. (2015). The issue of forecasting elements wear contact pairs devices electric rolling current collection. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 12(8), 1393-1397. (in Russian)
13. Teoreticheskie osnovy. (1989). In M. Khebdy, & A. V. Chichinadze (Eds.), *Spravochnik po tribotekhnike: v 3 tomakh*. (p. 400). Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
14. Ustyenko, D. V. (2016). Current state of the problem on current collection of electrified railways. *Electrification of transport*, 12, 71-75. (in Ukrainian)
15. Guangning Wu, Wenfu Wei, Guoqiang Gao, Jie Wu, & Yue Zhou (2016). Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph-catenary system. *Journal of Modern Transportation*, 24(2), 132-138. doi: 10.1007/s40534-016-0099-1 (in English)
16. Greenwood, J. A. (1966). Constriction resistance and the real area of contact. *British Journal of Applied Physics*, 17(12), 1621-1631. doi: 10.1088/0508-3443/17/12/310 (in English)
17. Janahmadov, A. K., & Jayadov, M. Y. (2016). *Synergetics and fractals in tribology*. Springer. doi: 10.1007/978-3-319-28189-6 (in English)
18. Jeng, D. R. & Heat, J. (1967). Thermal Contact Resistance in Vacuum. *Transfer*, 89(3), 275. doi: 10.1115/1.3614382 (in English)
19. Linqing Bai, Yonggang Meng, Zulfiqar Ahmad Khan, & Varian Zhang (2017). The Synergetic Effects of Surface Texturing and MoDDP Additive Applied to Ball-on-Disk Friction Subject to Both Flooded and Starved Lubrication Conditions. *Tribol Lett*, 65(4), 115-127. doi: 10.1007/s11249-017-0949-y (in English)

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. А. М. Мухомою (Україна)

Надійшла до редколегії: 14.02.2018

Прийнята до друку: 24.05.2018