

## ВТОРИННІ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНІ ТЕРТЯ КОНТАКТНОГО ПРОВОДУ

Досліджено процес утворення вторинних структур на поверхнях тертя контактних проводів у процесі експлуатації. Показана можливість отримання та модифікації вторинних структур матеріалу трибосистеми «контактний провід – струмоз’ємний матеріал» за допомогою лазерних технологій. Виявлено, що в матеріалі в зоні лазерного впливу протікають окисно-відновні реакції вуглекислого газу міддю, інтенсивні дифузійні процеси вуглецю в мідню матрицю.

Исследован процесс образования вторичных структур на поверхностях трения контактных проводов в процессе эксплуатации. Показана возможность получения и модификации вторичных структур материала трибосистемы «контактный провід – токоємный материал» с помощью лазерных технологий. Обнаружено, что в материале в зоне лазерного облучения протекают окислительно-восстановительные реакции углекислого газа медью, интенсивные диффузионные процессы углерода в медную матрицу.

The process of secondary structures formation on the friction surface of contact wire in the process of operation has been explored. A possibility of obtaining and modifying secondary material structures within the system «contact wire – current collection material» by means of laser technologies has been displayed. It has been established that in the laser irradiation area of the material reductive-oxidative interactions of carbon dioxide with copper as well as intensive diffusive processes of carbon into the copper matrix occur.

### Вступ

Взаємодія струмоприймача і контактної підвіски є тим процесом, від умов протікання якого залежить надійність і економічність електричної тяги на залізниці. Неправильний вибір конструктивних параметрів як контактної мережі, так і струмоприймачів, може стати причиною:

- частих відмов цих пристроїв;
- значних втрат матеріалу в контакті, що ковзає;
- погіршення роботи електрообладнання локомотивів;
- виникнення перешкод в пристроях зв’язку, розташованих в зонах залізниць;
- підвищення витрат на поточне обслуговування та ремонт.

Саме знос елементів у парі ковзання «контактний провід – струмоприймач» є однією з головних статей витрат на залізниці. Характер взаємодії цієї трибосистеми потребує всебічного дослідження і, можливо, прийняття нових наукових рішень, спрямованих на покращення її роботи.

Підвищення ресурсу і надійності спряжень пар тертя визначається їх сумісністю, під якою розуміють спроможність трибосистеми реалізувати оптимальний стан по визначених критеріях в заданому діапазоні умов роботи.

Сумісність системи виявляється як під час припрацювання, так і в подальшому етапі роботи.

Процес припрацювання контактної проводу в парі з струмоз’ємними вставками може тривати декілька років. Він супроводжується надмірним зношуванням, тобто перевищує звичайний знос, який відбувається при нормальній роботі, в декілька разів.

При терті всі фізико-хімічні процеси намагаються зосередитися в тонкому поверхневому шарі. Це є змістом принципу вторинної дисипативної гетерогенності Л. І. Бершадського [1–3].

У результаті взаємодії на поверхні тертя утворюються вторинні структури, а саме, явище їх утворення є структурною пристосованістю елементів. У процесі припрацювання трибосистем робоча поверхня контактної проводу структурно пристосовується до матеріалу струмоз’ємних вставок.

Згідно з принципом Ле-Шательє [4] трибосистема реагує на зовнішній вплив (тертя) таким чином, щоб зменшити результат цього впливу, тобто знос. Реакцією взаємодії матеріалу спряжених тіл на тертя і є утворення вторинних структур, які відіграють роль захисних функцій.

### Мета та задачі досліджень

Метою даної роботи є дослідження закономірностей утворення вторинних структур контактних проводів у процесі їх експлуатації та винайдення можливостей керування цими структурами.

Для реалізації мети розв'язуються такі задачі:

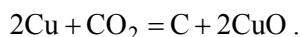
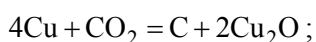
- дослідити утворення вторинних структур і їх вплив на процес припрацювання;
- показати на прикладі лазерних технологій отримання та модифікування вторинних структур робочої поверхні контактної проводу.

Вторинні структури робочої поверхні контактних проводів, сформовані в процесі припрацювання трибосистеми. Утворення сумісних елементів трибосистеми пов'язане з виникненням незворотних процесів, внаслідок чого змінюється ентропія і виникає дисипативна самоорганізація. Дослідження дисипативних вторинних структур дозволяє внести корективи в процеси припрацювання спряжених деталей.

Згідно з дослідженням, проведеним у роботі [1; 2], в процесі тертя на утворення вторинних структур витрачається більше 90 % всієї підведеної до трибосистеми енергії. Отже, в процесі тертя утворюється дисипативна зона з підвищеним рівнем внутрішньої енергії поверхневих шарів. Для процесів тертя, за умови однакової щільності поверхневої енергії системи у початковий момент, з ростом нерівномірності розподілення енергії ентропія системи повинна знижуватися. Зниження ентропії свідчить про упорядкованість системи тертя. Цей процес характеризується утворенням нових вторинних упорядкованих структур [5; 6].

Дослідження складу і процесів утворення вторинних структур робочої поверхні контактних проводів проведено в роботах [7–11]. Основну роль в утворенні неврівноважених вторинних структур і здійснення ними захисних функцій відіграє вуглець. Мова йде про вуглець, перенесений не з вставки, а той що утворюється в результаті хімічних реакцій розкладу окислів вуглецю чи відновлення їх міддю. Ці хімічні реакції мають неврівноважений характер протікання і визначаються такими параметрами стану, як градієнти температури, тиску, хімічного потенціалу, напруги та ін.

Для реакцій відновлення вуглецю міддю характерними є такі рівняннями:



Інтенсивне проходження реакцій розкладу двоокису вуглецю в трибосистемі з струмом досліджено в роботі [12]. Автори цієї роботи експериментально показали, що інтенсивне проходження зазначених реакцій спричиняє значне зниження інтенсивності зношення спряженої пари.

Нами досліджена мікроструктура робочої поверхні мідного контактної проводу марки МФ-100. Дослідження поверхні проводили на скануючому електронному мікроскопі «Самека», на зразках, вирізаних з нового контактної проводу та проводу після припрацювання з вугільними вставками. Особливу увагу сконцентровано на поверхневий шар, в який введений вуглець.

Результати досліджень показали, що на робочій поверхні мідного контактної проводу, що пройшов припрацювання, виявлено два структурних різновиди вуглецю. Один різновид – це ділянки плівки, яка покривала робочу поверхню контактної проводу. Вуглець у цьому випадку був «намазаний» на поверхню проводу в результаті електромеханічного процесу під час струмоз'єму.

Другий структурний різновид вуглецю має інше походження: у цьому випадку вуглець рівномірно розподілено по поверхні мідної матриці і подано у вигляді окремих молекул або поодиноких включень.

Кількісний аналіз вуглецю розміщеного на поверхні контактної проводу подано в табл. 1.

Таблиця 1

**Кількісний вміст вуглецю на робочій поверхні контактної проводу**

Характер нанесення вуглецю	Новий контактний провід	Контактний провід після припрацювання
«Намазаний» на поверхню тертя, % площі поверхні проводу	–	50–80
Введений у мідну матрицю, % мас	2,3–3,7	5,5–7

Дані, наведені в табл. 1, свідчать про те, що вторинні структури контактної проводу після припрацювання мають більшу кількість введених включень вуглецю. Отже, під час експлуатації при струмоз'ємі кількість вуглецю в мідній матриці збільшується переважно за рахунок проходження неврівноважених реакцій відновлення вуглецю з його окислів міддю.

Новий контактний провід теж містить введені частинки вуглецю, який попадає в матрицю при адсорбції вуглекислого газу на мідній поверхні.

У роботі [14] були розглянуті вторинні структури контактної проводу, що утворилися в результаті електромеханічної взаємодії з вугільними вставками. Експериментально показано, що чим більша площа робочої поверхні

проводу, яка покрита перенесеним («намазаним») вуглецем, тим більша інтенсивність зношування проводу і струмоз'ємного матеріалу. Крім цього авторами роботи виявлено, що зі зменшенням концентрації зануреного вуглецю в мідній матриці – інтенсивність зношування обох контактів збільшується. Інтенсивність зношування контактів, що ковзають, збільшується при проходженні врівноважених процесів у вторинних структурах (рекристалізація) і зменшується при проходженні неврівноважених процесів (реакція розкладу окислів вуглецю).

Зниження інтенсивності зношування при проходженні неврівноважених процесів на поверхнях тертя можна пояснити тим, що робочі поверхні потребують більших витрат енергії і відповідно до цього знижується частка енергії тертя, яка йде на руйнування поверхні.

### Про можливість формування вторинних структур на робочій поверхні контактного проводу до його експлуатації

Введені частинки вуглецю на робочій поверхні нового контактного проводу треба сформувати так, щоб вони були рівномірно розподілені по поверхні тертя. Такого насичення можливо досягти, використавши концентровані потоки енергії, наприклад, лазерне випромінювання [15].

Вторинні структури на робочій поверхні контактного проводу під час експлуатації утворюються в результаті проходження реакцій відновлення вуглекислого газу міддю. Для того щоб здійснити такі реакції потрібно змінити хоча б один з параметрів неврівноваженого стану. Таким параметром може бути градієнт температур.

Якщо підвищити рівень температури рекристалізації мідного контактного проводу, яка складає (275 °С), то неврівноважені процеси відновлення вуглецю міддю почнуть відбуватися раніше процесу рекристалізації, тобто зменшиться величина механічного зносу. У цьому випадку також доцільно використати концентровані потоки енергії.

Застосування лазерних технологій відкриває можливість сформувати вторинні структури контактного проводу і відтіснити вгору температуру рекристалізації [15; 16].

Новий мідний контактний провід опромінювали на лазерній установці «Комета-2», що має безперервне випромінювання на довжині хвилі  $\lambda = 10,6$  мкм.

При обробці робочої поверхні проводу варіювали такі технологічні параметри:

- потужність випромінювання  $P$  – 400...1000 Вт;

- діаметр лазерного випромінювання  $d$  – 3...8 мм;

- швидкість поздовжньої подачі зразка проводу  $v$  – 10...30 мм/с.

Для більш інтенсивного протікання процесу відновлення вуглецю міддю в зону лазерного впливу направляли потік вуглекислого газу (рис. 1) під тиском.

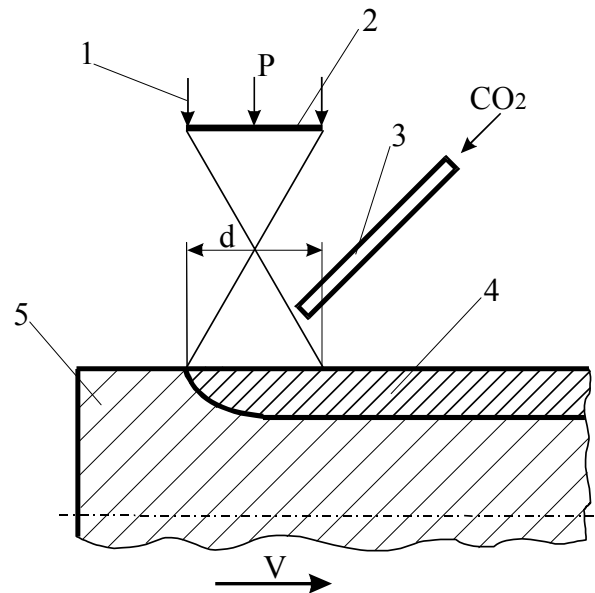


Рис. 1. Принципова схема лазерного опромінювання контактної проводу:  
1 – пучок лазерного променя; 2 – фокусувальна лінза;  
3 – патрубок з вуглецевим газом; 4 – сформований шар;  
5 – зразок контактної проводу

Було виявлено, що інтенсивність протікання окисно-відновних реакцій суттєво залежить від технологічних параметрів лазерної обробки, а також від тиску вуглекислого газу.

Дослідження показали, що в матеріалі в зоні лазерного впливу крім окисно – відновних реакцій протікають інтенсивні дифузійні процеси вуглецю в мідну матрицю.

Характерний вигляд мікроструктури поверхні тертя зразка контактної проводу для зазначеного способу її формування наведено на рис. 2.

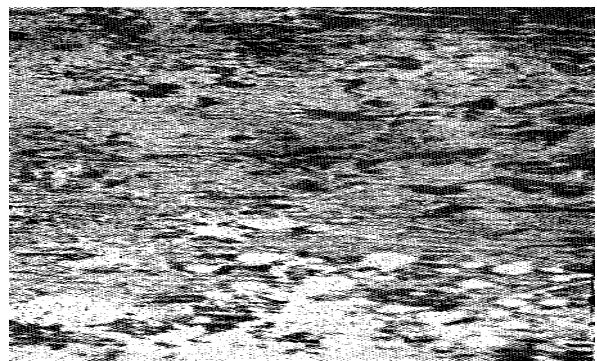


Рис. 2. Мікроструктура робочої поверхні контактної проводу після лазерного опромінювання ( $\times 250$ , тиск  $\text{CO}_2$  – 0,1 МПа).

На рис. 2 темні острівки – це введені частки вуглецю в мідь. Ступінь охоплення площі поверхні вуглецевими острівками визначається режимами лазерного опромінення та тиском вуглекислого газу, спрямованого в зону лазерного впливу.

### Порівняльні випробування на зносостійкість трибосистеми «контактний провід – вставка» на машині тертя

На лабораторній установці імітувалась робота пари тертя «контактний провід – струмоз’ємний матеріал». Кільце з мідного контактного проводу марки МФ-100 довжиною 2130 мм припаювалось до мідного диску, який може обертатися зі швидкістю 1 об/хв. Зверху, до кільця притискалися дві струмоз’ємні вставки типу «А». Для наближення до реальних умов експлуатації контактний провід і струмоприймач вісь обертання кільця була зміщена відносно центру кільця на 21 мм. Знос проводу визначали за допомогою мікрометражу, а знос вставок – ваговим методом. В процесі випробувань досліджували залежність інтенсивності зношування мідного контактний проводу до і після лазерного опромінення та струмоз’ємних вставок типу «А» від величини струму, що знімається. Отримані дані наведені в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

#### Інтенсивність зношування трибосистеми без лазерного опромінення контактний проводу

Струм, А	0	20	50	95
Інтенсивність зношування струмоз’ємних вставок типу «А», мг/год	2,9	7,1	16,2	8,2
Інтенсивність зношування контактний проводу, мкм/год	0,2	0,3	0,8	0,3

Таблиця 3

#### Інтенсивність зношування трибосистеми після лазерного опромінення контактний проводу

Струм, А	0	20	50	95
Інтенсивність зношування струмоз’ємних вставок типу «А», мг/год	2,0	3,2	3,3	3,0
Інтенсивність зношування контактний проводу, мкм/год	0,1	0,1	0,1	0,1

Можна бачити, що інтенсивність зношування елементів трибосистеми «контактний провід – вставка» залежить від величини струму, що знімається, але після лазерного опромінення контактний проводу запропонованим способом знос струмоз’ємних вставок стає усталеним, а знос контактний проводу практично не залежить від величини струму, що знімається.

Результати випробувань на зношування свідчать про те, що в досліджуваній парі тертя відбуваються невірноважені реакції відновлення вуглецю міддю.

### Висновки

Дослідження, проведені в даній роботі показали:

1. У процесі припрацювання на робочій поверхні контактний проводу утворюються вторинні структури, призначення яких захистити поверхневий шар від процесу електромеханічного зношування.

2. Інтенсивність зношування контактів, що ковзають, збільшується при проходженні ввірноважених процесів у вторинних структурах і зменшується при проходженні невірноважених процесів.

3. В умовах експлуатації невірноважені процеси введення частинок вуглецю в робочу поверхню контактний проводу протікають завдяки окисно – відновних реакцій вуглецю міддю.

4. Інтенсивністю протікання окисно-відновних реакцій можна керувати, змінюючи фізико-хімічні параметри невірноваженого стану поверхневих шарів матеріалу.

5. Одним з керованим параметром невірноваженого стану матеріалу, підлеглого обробці концентрованими потоками енергії (лазерне випромінювання) є градієнт температури.

6. У результаті застосування лазерного опромінення поверхні тертя мідного контактний проводу вдалося підняти температуру рекристалізації міді до 350 °С.

7. Протікання невірноважених процесів в трибосистемі допомагає зменшити зношувальність її елементів.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бершадский – К.: Техника, 1976. – 423 с.
2. Klamecki В. Е. Energy Dissipation in Sliding // Wear 77 (1982). № 2. – Р. 115–128.
3. Бершадский Л. И. Структурная термодинамика трибосистем. – К.: «Знання», 1990. – 30 с.
4. Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И. Пригожин – М.: Мир, 1973. – 149 с.

5. Гершман И. С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И. С. Гершман, Н. А. Буше // Трение и износ, 1995. – № 1. – т. 16. – С. 61–70.
6. Буше Н. А. Совместимость трущихся поверхностей / Н. А. Буше, В. В. Копытько. – М.: Наука, 1981. – 127 с.
7. Гершман И. С. Роль углерода в самоорганизации процесса изнашивания сильноточных скользящих электрических контактов / И. С. Гершман, С. М. Трушевский, А. В. Шумицкий // Трение и износ, 2002. – № 5 – т. 23. – С. 520–523.
8. Берент В. Я. Вторичные структуры на поверхностях сильноточных скользящих контактов. 1. Строение и состав / В. Я. Берент, И. С. Гершман // Трение и износ, 1989. – № 4. – т. 10. – С. 687–692.
9. Гершман И. С. Исследование закономерностей образования вторичных структур в условиях трения с токосяемом / И. С. Гершман, Н. В. Пенский // Трение и износ. 1995. – № 1. – т. 16. – С. 126–131.
10. Гершман И. С. Исследование закономерностей образования вторичных структур в условиях трения с токосяемом / И. С. Гершман, Н. В. Пенский // Трение и износ. 1995. – № 1 – т. 16. – С. 126–131.
11. Гершман И. С. Термодинамические аспекты существования устойчивых вторичных структур на поверхностях сильноточных скользящих контактов / И. С. Гершман, Н. А. Буше, В. Я. Берент // Трение и износ. 1989. – № 2 – т. 10. – С. 225–232.
12. Гершман И. С. Неустойчивость системы с токосяемом в процессе самоорганизации / И. С. Гершман, Н. А. Буше // Трение и износ. 1999. – № 6. – т. 20. – С. 623–629.
13. Гершман И. С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И. С. Гершман, Н. А. Буше // Трение и износ. 1999. – № 1. – т. 16 – С. 61–70.
14. Гершман И. С. Токосяемные углеродные материалы нового поколения // Вестник ВНИИЖТ, 2003, № 6. – С. 70–78.
15. Аулин В. В. Электропроводность меди после лазерного воздействия / В. В. Аулин, Г. М. Ашмарин, М. Ю. Голубев // Металлы. – Изв. АН СССР, 1986. – № 5. – С. 187–195.
16. Аулин В. В. Зернограничное внутреннее трение нелегированной меди, подвергнутой непрерывному лазерному облучению / В. В. Аулин, Г. М. Ашмарин, М. Ю. Голубев // Физика и химия обработки материалов. – АН СССР, 1986. – № 5. – С. 147–151.

Надійшла до редколегії 21.05.2005.