

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО

На правах рукопису

Коваль Віталій Анатолійович

УДК 621.3.064.21.018.46:629.113.62

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОВЗНИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТІВ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ**

Спеціальність 05.22.09 – Електротранспорт

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Сергієнко Сергій Анатолійович
кандидат технічних наук, доцент

Кременчук – 2013

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5	
РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ КОВЗНИХ КОНТАКТІВ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ, ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....		11
1.1 Стан питання надійності міського електротранспорту.....	11	
1.2 Особливості роботи та дослідження надійності ковзних контактів міського електротранспорту.....	13	
1.3 Основні напрямки підвищення надійності експлуатації ковзних електричних контактів.....	27	
1.3.1. Загальна характеристика методів підвищення надійності ковзних контактів.....	27	
1.3.2. Напрямки підвищення надійності ковзних контактів.....	28	
1.4 Висновки. Мета та задачі досліджень.....	42	
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ КОВЗНИХ КОНТАКТІВ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ.....		44
2.1 Теоретичні передумови.....	44	
2.2 Математична модель динаміки зношування ковзних контактів.....	46	
2.3 Зміна форми ковзних контактів в процесі експлуатації.....	50	
2.4 Аспекти підвищення надійності ковзних контактів міського електротранспорту.....	57	
2.5 Критерій можливості підвищення надійності ковзних контактів....	62	
2.6 Висновки.....	71	
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....		74
3.1 Методика досліджень структури ковзних контактів.....	74	

3.2 Будова і принцип дії установки для випробування зносостійкості лабораторних зразків.....	78
3.3 Будова і принцип дії установки для випробування зносостійкості вставок.....	79
3.4 Методика досліджень фізичних властивостей ковзних контактів	81
3.5 Методика досліджень електротехнічних властивостей ковзних контактів.....	83
3.6 Методика дослідження триботехнічних властивостей ковзних контактів.....	84
3.6.1 Величина зносу.....	84
3.6.2 Контактний опір.....	85
3.6.3 Шорсткість поверхні.....	87
3.6.4 Коефіцієнт тертя.....	87
3.6.5 Температура в зоні контакту.....	88
3.7 Методика дослідження ресурсу зразків ковзних контактів.....	90
3.8 Методика експлуатаційних випробувань струмоприймачів з ковзними контактами міського електротранспорту.....	91
3.8.1 Місце проведення випробувань.....	92
3.8.2 Методика вимірювання зносу контактного проводу під час експлуатаційних випробувань.....	92
3.8.3 Методика оцінки ступеню спрацювання вставок.....	94
3.9 Математико-статистична обробка результатів експериментальних досліджень та їх оптимізація.....	94

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ТА СТЕНДОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОВЗНИХ КОНТАКТІВ.....	97
4.1 Лабораторні дослідження зразків ковзних контактів.....	97
4.1.1 Фізико-механічні, електро- та триботехнічні властивості дослідних зразків.....	97
4.1.2 Дослідження зносостійкості зразків.....	102

4.2 Стендові випробування ковзних контактів.....	105
4.2.1 Величина та інтенсивність зносу ковзних контактів.....	105
4.2.2 Контактний електроопір.....	109
4.2.3 Шорсткість поверхні.....	112
4.2.4 Коефіцієнт тертя.....	112
4.2.5 Температура в зоні контакту.....	115
4.3 Структура та субструктура робочих поверхонь ковзного контакту.....	119
4.4 Фізико-механічні властивості елементів ковзного контакту у процесі взаємодії.....	122
4.5 Висновки.....	127
РОЗДІЛ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ КОВЗНИХ КОНТАКТІВ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ.....	
5.1 Експлуатаційні дослідження ковзних контактів.....	130
5.1.1 Величина зносу контактного проводу.....	130
5.1.2 Величина зносу вставок.....	133
5.2 Техніко-економічна ефективність застосування запропонованих ковзних контактів міського електротранспорту.....	136
5.3 Висновки.....	142
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	149
ДОДАТКИ.....	165

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з потужних споживачів електроенергії в Україні є міський електротранспорт. Ця галузь народного господарства набула стратегічного значення для соціально-економічного розвитку держави і за будь-яких умов зберігає провідну роль у міських пасажироперевезеннях.

Сучасний етап розвитку країни супроводжується збільшенням випуску більш досконалого рухомого складу міського електротранспорту за нестримного зростання обсягів пасажироперевезень. Але існує проблема заміни морально та фізично застарілого рухомого складу міського електротранспорту. Крім того, виникає необхідність забезпечення електротранспорту, який експлуатується, високим рівнем надійності всіх його складових.

Підвищення надійності, економічності та продуктивності міського електротранспорту, зниження його матеріало- та енергоємності безпосередньо пов'язане з розвитком фундаментальних і прикладних досліджень в області тертя і зносу, оскільки саме рухомі з'єднання є найменш надійними елементами і зумовлюють великі матеріальні і енергетичні втрати.

До одних з найбільш поширених на міському електротранспорті рухомих з'єднань належать ковзні електричні контакти. Особлива складність розв'язання триботехнічних проблем у ковзних електричних контактах зумовлена дією електричного струму, що призводить до інтенсифікації умов зовнішнього тертя і зношування. Даним питанням займалися такі відомі вчені, як Айзенкольб Ф., Андрієвський Р.А., Анциферов В.Н., Берент В.Я., Большаков Ю.Л., Буше М.А., Гегузин Я.Е., Гершман І.С., Міхеев В.П., Самсонов Г.В., Федорченко І.М. та ін.

Електричні ковзні контакти міського електротранспорту виготовлені з традиційних матеріалів (композиційні вугільні та вугільно-графітні, електро- та метало графіти, мідь і її сплави та ін.) не завжди відповідають вимогам, які висуваються з метою забезпечення надійності та довговічності струмознімального вузла, в умовах підвищення швидкісних режимів і режимів

навантажень. Крім того, існує проблема зниження дефіцитності матеріалів, які застосовуються в струмознімачах різного призначення.

Серед усього різноманіття ковзних електричних контактів менш за все вивченими є контакти міського електротранспорту. Тож надзвичайно актуальним є дослідження існуючих ковзних електричних контактів і розробка нових, які б відповідали жорстким вимогам експлуатації міського електротранспорту в екстремальних умовах (низькі температури, підвищена вологість та. ін.).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні "Енергетика та енергозбереження" (Постанова Кабінету Міністрів України № 631 від 04.07.2006 р.), а також плану науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України – “Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі” та включена до плану бюджетних НДР Міністерства освіти і науки України: тема 7Д/03-ЦЕНТР “Дослідження та розробка систем енергомоніторингу електромеханічного обладнання промислових підприємств”, № ДР0103U000804, м. Кременчук, 2008–2009 рр.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення надійності експлуатації ковзних електричних контактів міського електротранспорту, розробка та використання контактів з матеріалів, які володіють підвищеними фізичними, електро- та триботехнічними властивостями. Для реалізації поставленої мети необхідним є розв'язання наступних задач:

- проаналізувати особливості роботи ковзних контактів міського електротранспорту, основні напрями підвищення їх надійності експлуатації;
- побудувати математичну модель динаміки зношування ковзних контактів;
- теоретично обґрунтувати можливість підвищення надійності експлуатації ковзних контактів міського електротранспорту;
- розробити контакти з матеріалів, які мають підвищені властивості;

– дослідити фізичні, електро- та триботехнічні властивості розроблених ковзних контактів;

– провести стендові та експлуатаційні випробування розроблених ковзних контактів, з урахуванням вимог експлуатації, міського електротранспорту;

– дати оцінку техніко-економічної ефективності застосування запропонованих ковзних контактів.

Об’єкт дослідження – процес експлуатації міського електротранспорту.

Предмет дослідження – експлуатаційні характеристики ковзних контактів міського електротранспорту.

Методи дослідження. Під час проведення теоретичних досліджень були використані основні положення теорії надійності технічних систем, електромеханічних процесів, фізики твердого тіла, теорії тертя та зношування, теорії фізико-хімічних процесів.

При проведенні експериментальних досліджень стан зносу ковзного контакту, а також зміну характеристик досліджували на лабораторній установці. Вимірювання величини зносу контактного проводу проводили методом штучних баз, а вставок – ваговим методом.

Доцільність застосування розроблених струмознімальних ковзних контактів і їх вплив на надійність експлуатації, тобто ресурс, а також техніко-економічну ефективність визначали шляхом стендових і експлуатаційних досліджень у реальних умовах.

Теоретичні розрахунки та статистичну обробку експериментальних даних проводили з використанням прикладних програм на ЕОМ, використовуючи методи математичної статистики.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджується адекватно вибраним математичним апаратом, проведенням експериментальних досліджень з достатньою збіжністю одержаних теоретичних і практичних результатів, позитивними результатами використання розроблених ковзних контактів на міському електротранспорті.

Положення та висновки, наведені в дисертації, достатньо науково обґрунтовані. Основні припущення та спрощення, використані в роботі є коректними для розв'язання задач, які розглядаються в дисертації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

– уперше розроблено математичну модель динаміки зношування ковзних електричних контактів міського електротранспорту, яка дозволяє визначити величину зносу струмознімальної вставки при відповідному пробігу та експлуатаційних навантаженнях міського електротранспорту;

– уперше отримано аналітичні залежності для визначення складу вставок від експлуатаційних параметрів роботи міського електротранспорту, що дозволяє підвищити надійність роботи ковзних електричних контактів.

– встановлено та обґрунтовано закономірності зміни інтенсивності зносу ковзних контактів міського електротранспорту за висотою та шириною, що дало можливість керувати процесом їх зносу, змінюючи технологічні та конструктивні параметри струмознімальних вставок.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

– створено математичну модель динаміки зношування ковзних контактів міського електротранспорту, придатну для визначення силових, кінематичних, динамічних та енергетичних параметрів, необхідних для проектування ковзних електричних контактів та оцінювання їх експлуатаційних властивостей;

– на основі результатів експлуатаційних випробувань нових ковзних контактів міського електротранспорту відпрацьовано і надано Кременчуцькому тролейбусному управлінню рекомендації щодо їх застосування для підвищення надійності експлуатації;

– теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість підвищення надійності експлуатації нових розроблених ковзних контактів міського електротранспорту. Скорочення експлуатаційних витрат електротранспорту складає 5...25 грн/1000 км (2,5...12,5 %).

Особистий внесок здобувача. Автором разом з науковим керівником дано оцінку величини та характеру зносу ковзних контактів електротранспорту м. Кременчука. Обґрунтовано можливість використання нових ковзних

контактів для підвищення надійності та ефективності експлуатації міського електротранспорту. Сформульовано мету та задачі досліджень.

Автором самостійно сформульовано наукові положення. Теоретично обґрунтовано і експериментально уточнено та підтверджено раціональний склад ковзних контактів. Проведені експериментальні дослідження характеру та величини зносу ковзних контактів, як існуючих, так і запропонованих, а також їх лабораторні, стендові та експлуатаційні випробування відповідно до поставлених задач. Розроблені рекомендації щодо вибору технологічних режимів виготовлення ковзних контактів для одержання комплексу необхідних фізико-механічних, електро- та триботехнічних характеристик та доведена техніко-економічна ефективність їх застосування.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень доповідалися на: всеукраїнській конференції молодих вчених, аспірантів, студентів «Транзитна територія» (м. Кременчук, 2011 р.), X Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». (м. Кременчук 28–29 березня 2012 р.), III Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики» (м. Євпаторія, 3-8 травня 2012 р.)

Результати дисертаційної роботи у повному обсязі доповідалися і отримали схвалення на міжкафедральному науковому семінарі кафедр «Електротехніки та електромеханіки», «Електрорухомий склад», «Електропостачання залізниць», «Локомотиви» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 7 статей, у тому числі, 7 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 – без співавторів), 3 публікації тез у матеріалах міжнародних наукових конференцій та отримано 2 патенти на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Загальний обсяг роботи становить 179 сторінок. Основний матеріал дисертації складається зі вступу, п'яти розділів,

загальних висновків, викладених на 148 сторінках друкованого тексту та містить 38 рисунків, 15 таблиць. Додатки викладені на 15 сторінках, а список використаних джерел становить 188 найменувань, розміщених на 16 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ КОВЗНИХ КОНТАКТІВ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ, ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1.1 Стан питання надійності міського електротранспорту

Одним з потужніших споживачів електроенергії в народному господарстві України є міський електротранспорт. В умовах світової економічної кризи він зберігає провідну роль у міських пасажироперевезеннях. Сучасний етап розвитку країни супроводжується збільшенням випуску більш досконалого рухомого складу міського електротранспорту. Але існує проблема заміни морально та фізично застарілого рухомого складу міського електротранспорту. Крім того, електротранспорт необхідно забезпечити високим рівнем надійності усіх його складових.

Надійність є комплексною властивістю, яка включає безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та збережувальність [76]. Розглянемо більш детально стан питання надійності міського електротранспорту відповідно до [76], на прикладі тролейбуса.

У теорії надійності технічних систем значна увага приділяється відмовам, положення та моделі яких визначаються [77]. Тому в роботі проведені дослідження відмов систем тролейбуса, розподіл яких наведено на рис. 1.1, які отримані за статистичними даними роботи електротранспорту міста Кременчука.

В наведеному прикладі видно, що найбільше відмов систем тролейбуса припадає на електричне обладнання, як для нових, так і тих, що були значний час в експлуатації. Далі, більш детально, розглянемо розподіл відмов для систем електричного обладнання тролейбуса, результати яких наведено на рис. 1.2.

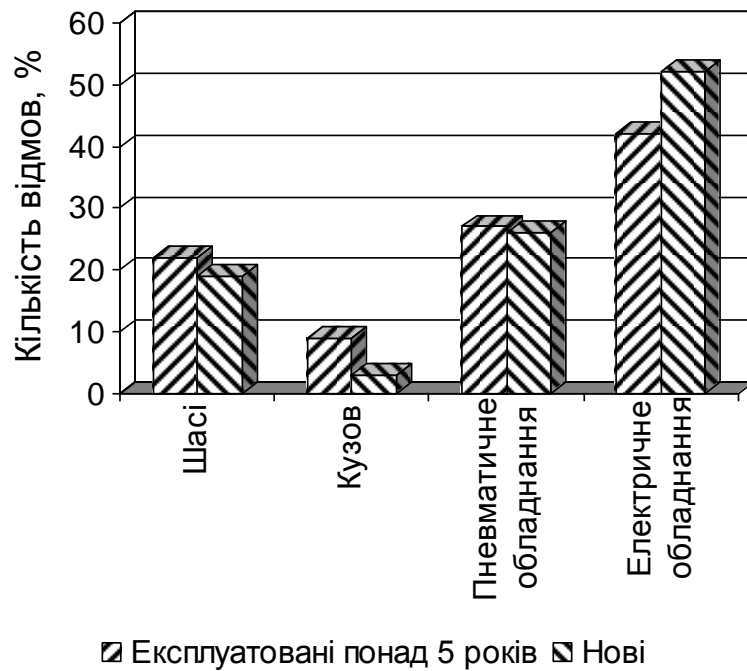


Рисунок 1.1 – Розподіл відмов систем троллейбуса

Можна твердити, що в процесі експлуатації кількість відмов струмоприймачів троллейбусів є найбільшою. Крім того, значний внесок у загальну кількість відмов струмоприймачів роблять ковзні контакти, що взаємодіють з контактними проводами.

За ресурсними характеристиками ковзні контакти знаходяться на останньому місці серед сукупності деталей та елементів міського електротранспорту [48]. Враховуючи специфіку експлуатації, а також недосконалість технології виготовлення ковзних вставок струмоприймачів міського електротранспорту, останні повинні мати високу надійність та економічність.

Як вже вказувалось, надійність є комплексною властивістю. Тому, для надійності ковзних контактів міського електротранспорту виділимо основні характеристики: безвідмовність та довговічність.

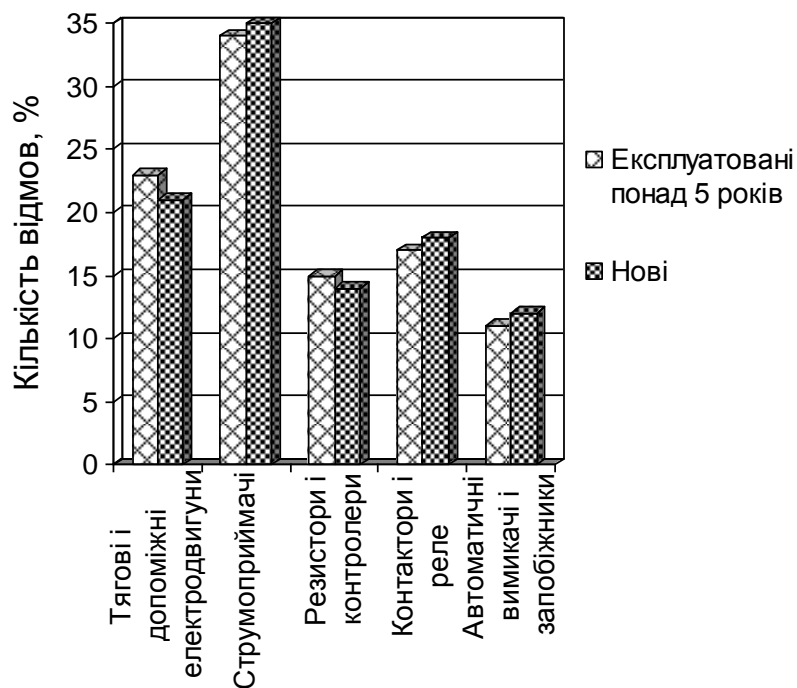


Рисунок 1.2 – Розподіл відмов систем електричного обладнання тролейбуса

До основних показників безвідмовності ковзних контактів відносяться ймовірність безвідмовної роботи, частота відмов, середнє напрацювання на відмову; до показників довговічності – середній ресурс та середній строк служби, які визначаються параметрами зносу (величиною, інтенсивністю).

1.2 Особливості роботи та дослідження надійності ковзних контактів міського електротранспорту

Однією з відповідальних систем, від якої залежить безпека руху на міських автошляхах безумовно є «струмоприймач – контактний провід» міського електротранспорту. Серед складових деталей струмоприймачів електротранспорту найменшим ресурсом мають ковзні контакти [10, 11, 76, 78, 98, 110, 111, 119, 138].

Контактні вставки міського електротранспорту, які встановлені на струмоприймачах служать для забезпечення живлення рухомого складу від

контактної мережі [11,78]. Вони повинні забезпечувати надійне проходження струму, як під час стоянки, так і під час руху електротранспорту за різними маршрутами, а також при їх відхиленні від осі підвіски контактних проводів.

Для забезпечення надійності роботи ковзних контактів міського електротранспорту ставлять вимоги щодо їх фізико-механічних та триботехнічних властивостей. Особливою складністю при вирішенні триботехнічних проблем у ковзних контактах є дія електричного струму, яка приводить до підсилювання умов зовнішнього тертя і зношування.

Контактні вставки міського електротранспорту, які виготовлені з традиційних та композиційних матеріалів не відповідають техніко-експлуатаційним вимогам, що висуваються для забезпечення надійності і довговічності даної системи, особливо, в умовах посилення навантажувально-швидкісних режимів експлуатації міського електротранспорту та, виходячи з техніко-економічного критерію. Тобто створення матеріалів для ковзних контактів, які задовольняли б жорстким вимогам експлуатації в екстремальних умовах є актуальною задачею для науково-дослідних установ та окремих розробників.

У процесі тертя, за наявності механічного та електроерозійного зносу струмознімальні вставки підлягають інтенсивному стиранню, крім того втрачають працездатність через удари з наступними механічними руйнуваннями. При цьому їх нормативний термін експлуатації становить 80 км пробігу [110, 138].

Відповідно до технічних умов, струмоприймачі міського електротранспорту знімають постійну напругу величиною 550 В, а допустимий струм не повинен перевищувати 170 А. Натискання струмоприймача на контактний провід не повинне перевищувати 140 Н [10, 76]. Тобто ковзні контакти повинні мати достатньо високі фізико-механічні, електро- та триботехнічні властивості.

Аналіз умов роботи ковзних контактів показує, що міський електротранспорт м. Кременчук експлуатується у складних кліматичних умовах. Це пов'язано з розташуванням міста на р. Дніпро, що є причиною

високої вологості повітря, а також утворення інею на контактних проводах у зимовий період. Такі фактори призводять до появи електричної дуги між контактуючими поверхнями ковзного контакту. Наслідком цього в процесі руху міського електротранспорту є значний знос вставок і контактного проводу, особливо при низьких температурах. Екологічна ситуація м. Кременчука, а також наявність на контактній мережі невідрегульованих спецчастин або частин, які знаходяться в несправному стані мають негативний вплив на надійність та довговічність ковзних контактів [11, 138]. Також підприємства електротранспорту використовують ковзні контакти, які виготовлені з матеріалу, що не відповідає умовам експлуатації або з технологічними недоліками. Тобто ковзні контакти або не виробляють нормативний ресурс, або призводять до погіршення стану поверхні мідного контактного проводу і прискорення його інтенсивності зношування.

Вставка є деталлю головки струмоприймача (рис. 1.3), яка, безпосередньо стискаючись з проводом, здійснює струмознімання. Від вставки багато в чому залежить якість струмознімання: безперервність контакту, величина механічного і електричного зносу контактного проводу, іскріння, радіоперешкоди, електричні втрати тощо. Правильний вибір матеріалу вставки не менш важливий, ніж гарна конструкція струмоприймача і його головки. Проте створення високоякісної вставки, яка задовольняла б усім вимогам експлуатації - вельми складне завдання. Це пояснюється складними умовами експлуатації. Також, на роботу вставки здійснює вплив непостійне значення питомого натиснення на контактний провід [10, 138]. При цьому, коливання натиснення струмоприймача викликані як безперервною зміною в процесі роботи величини натиснення на провід, так і зміною величини робочої контактної поверхні. У залежності від швидкості руху міського електротранспорту, натиснення контактної вставки може змінюватися плавно, в результаті поступової зміни за часом результуючої сили контактного тиску, а також раптово, внаслідок ударного характеру додаткових сил взаємодії струмоприймача та контактної мережі.

Плавні зміни натиснення відбуваються під час поступової зміни рівня підвіски контактної мережі. У цьому випадку величина натиснення визначається статичною характеристикою струмоприймача. За несприятливої статичної характеристики контактне натиснення змінюється в межах 0...60% [110, 111, 119].



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд головки струмоприймача ГТ – 14

Різкі зміни натиснення контакту часто викликаються нерівностями дорожнього покриття або власними коливаннями штанги струмоприймача, що призводить до зміни натиснення в межах від +15 до -20% від номінального статичного тиску [10, 11]. Інший тип навантаження, який має характер удару і призводить до руйнування заходної частини контактної вставки, виникає в момент проїзду струмоприймачем точок контактної мережі, в яких відбувається різке зниження еластичності проводу. Величина ударного навантаження на вставку збільшується у 2-3 рази від статичного натиснення головки [10]. Таким чином, натиснення вставки визначається дією статичних і динамічних навантажень на головку струмоприймача при її взаємодії з контактною мережею, а значення можуть коливатися в широкому діапазоні.

Що стосується площі контактної поверхні, то в ідеалі вся робоча поверхня проводу повинна повністю прилягати до вставки. Але відомо [11], що фактична площа ковзних контактів міського електротранспорту, через яку здійснюється струмознімання складає 5...20%. У поздовжньому напрямі

вставка зношується нерівномірно, а її західна частина має завжди підвищений знос. Зразки зношування вставок струмоприймачів міського електротранспорту наведено на рис. 1.4.

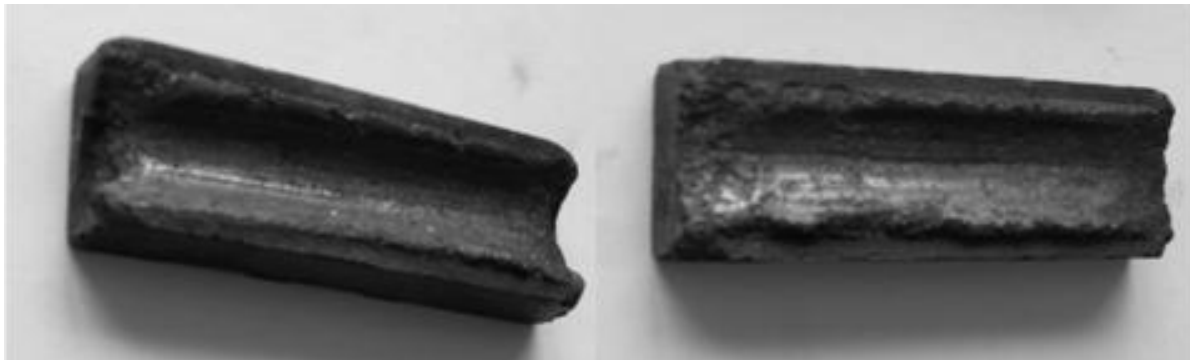


Рисунок 1.4 – Зразки зносу вставок струмоприймачів

Під час експлуатації міського електротранспорту прилягання вставки до проводу в усіх точках неможливе, оскільки ширина внутрішньої частини обойми вставки по всій площині вставки завжди більше поперечного розміру контактної проводу [138]. Це відбувається через умови вписування обойми головки струмоприймача при русі на кривих ділянках контактної мережі, тобто вставка під дією бічних сил переміщується по проводу і зношує свої бічні поверхні. При цьому на вставці утворюється сідлоподібна поверхня [98, 111, 119]. Сколювання на вставках струмоприймача відбуваються внаслідок ударів об контактний провід, які теж призводять до зменшення робочої площі ковзного контакту.

Натиснення вставок струмоприймачів на контактний провід коливається від 100 до 140 Н [10, 11]. Значна розбіжність сили натиснення виникає через великі зміни розмірів площі контакту. Велике значення сили натиснення вставок спричиняє підвищення зносу контактної проводу і, тим самим, збільшення коефіцієнту тертя.

На роботу вставок струмоприймачів міського електротранспорту впливає також і густина струму. Різке її коливання викликається зміною, як сили струму, так і площі контактування. У процесі експлуатації густина струму може досягати величини 156 A/cm^2 , а на тривалих режимах вона коливається в межах

10...100 А/см² [11, 138]. Підвищена густина струму негативно впливає на роботу вставки: зростають електричні втрати у ковзному контакті з наступним надмірним нагріванням і підвищеним зносом.

Характерною для роботи вставки є не тільки велика величина густини струму, але і стрибкоподібний характер навантаження, який викликає іскріння. Таке відбувається через стрибкоподібне збільшення густини струму, а також через велике значення густини струму у процесі нагрівання в контакті [124]. Іскріння в контакті виникає також при пошкодженні оксидної плівки на контактному проводі обоймою головки струмоприймача або в результаті дії зовнішнього середовища. Конструктивні недоліки, як струмоприймачів, так і контактної мережі, викликають зменшення питомого натиснення з наступним протіканням процесу іскріння.

Характерною умовою роботи ковзних контактів міського електротранспорту є зміна стану робочих поверхонь під впливом зовнішнього середовища [110, 112], тобто кліматичних факторів.

Згідно ГОСТ 15150-85 «Класифікація кліматичних факторів» до них відносять: температуру, вологість і тиск повітря; вітер, дощ, туман, іній; сонячну радіацію; різкі зміни температури; вміст в повітрі пилу і корозійно активних агентів.

Шкідливий вплив проявляється при зміні температури проводу контактної мережі, яка під час експлуатації визначається не тільки температурою повітря (це має місце під час монтажу), але і значенням струму [48, 50]. Найбільше нагрівання проводу виникає при співпадінні найвищої температури повітря і найбільшого струму. Для мідних проводів контактних підвісок, які використовуються на міському електротранспорті зміна температури може скласти 150°C [11]. Підвищення температури викликає розширення контактного проводу, що призводить до зменшення його натягу. При низьких температурах натяг проводу обмежений умовами міцності, а при найбільшому нагріванні проводу виникають недостатні натяги та великі стріли провисання. В результаті на міському електротранспорті погіршується

струмознімання. За останніми спостереженнями середньорічна температура повітря в Україні коливається в межах $-25...+33^{\circ}\text{C}$ [11].

Додаткові навантаження, такі як сила вітру і тиск ваги ожеледі, збільшують натяг контактних проводів [17, 18, 21], що може призвести до порушення їх нормальної роботи. І, якщо відбулося пошкодження струмоприймача чи обрив проводу, то воно є одним із самих критичних, яке призводить до зниження рівня безпеки міського руху.

Структура повітряних потоків у значному ступені залежить від їх швидкості, а пульсації вітру викликають додаткові динамічні навантаження на контактний провід і опорні конструкції, як контактної мережі, так і струмоприймачів міського електротранспорту. Відомо [10, 11], що для міського електротранспорту є граничні значення: швидкісний тиск вітру складає 393 Па, а швидкість вітру – 25 м/с.

Під впливом вітру, який спрямований під кутом приблизно 90° по відношенню до контактних проводів, в контактній мережі виникають автоколивання [17], які проявляються на проводах при утворенні ожеледі чи паморозі з порушенням правильної форми перерізу. Частоти коливань проводів наближаються до частоти власних коливань контактної мережі, а поряд з основною частотою виникають коливання з другою і третьою частотами [17]. Коливання контактної мережі досягають значних амплітуд, які мають стійкий і тривалий характер, а припиняються лише після зміни кліматичних умов. Автоколивання проводів призводять до справжніх порушень роботи ковзних контактів міського електротранспорту: при значних значеннях амплітуди стає неможливим струмознімання (струмоприймач не встигає слідувати за коливаннями контактного проводу) та відбувається пошкодження проводів і підтримуючих пристроїв.

Ожеледь вносить значні ускладнення в експлуатаційну роботу ковзних контактів міського електротранспорту. Незначна електропровідність льодяної стінки призводить до утворення іскріння при зніманні струму, що може бути причиною значних пошкоджень контактної поверхні проводу та вставок струмоприймачів, а також до перепалення проводу. Велика швидкість

повітряного потоку та інтенсивне утворення ожеледі викликають відрив струмоприймачів від проводів, постійне іскріння і, навіть, виникнення дуги [11, 16].

На проводах контактної мережі та струмоприймачах спостерігається відкладення ожеледі при нестійкій погоді [17, 86], коли відлига змінюється прохолодою, в туманну погоду чи при випаданні переохолодженого дощу.

Ожеледь, паморозь і суміш відкладаються в основному при вітрі з швидкістю до 10...15, рідше до 20...25 м/с. Коли напрямок вітру приблизно перпендикулярний осі проводу, ожеледні відкладання утворюються з вітряного боку. Якщо вітер спрямований вздовж проводу, то ожеледь відкладається по всій поверхні з меншою інтенсивністю і густиною.

Пил і корозійно активні агенти повітря утворюють умови для корозії проводу, в результаті чого зменшується його міцність [16]. Крім того, в контакті протікає абразивний знос, який призводить до наймасштабніших об'ємів руйнувань обох елементів ковзного контакту міського електротранспорту.

Інтенсивність процесів знеміцнення мідного контактного проводу в процесі взаємодії зі вставками визначається його нагріванням і розтягуючими навантаженнями, причому, по мірі збільшення розтягуючих напружень у перерізі проводу інтенсивність його знеміцнення збільшується [15, 16]. Цей факт встановлено металографічними і рентгеноструктурними дослідженнями металу контактних проводів [15].

Зношування елементів ковзних контактів характеризується поступовою зміною їх геометричних розмірів при терті, що виражається від'єднанням з поверхні тертя матеріалу або пластичною деформацією [10-13]. При деформації поверхонь під дією зовнішніх сил, а також термічної активації, тобто при отриманні додаткової енергії, можливий рух дислокацій, коли викривлення ґратки від дислокацій передаються в інші області кристала.

Згідно роботи [16], несприятливими для струмознімання метеорологічними умовами є низькі температури навколишнього повітря, а також підвищена вологість при низьких температурах, яка є причиною

утворення інею. В цих умовах погіршується робота всіх пристроїв контактної мережі і відбувається катастрофічний знос контактної вставки.

Згідно джерела [31], струмознімання під час інею і ожеледі істотно порушується лише у перших машин, випущених на лінію після нічної перерви, а у наступних це виявляється у меншій мірі, оскільки осідання при частому русі не встигають обволочувати контактні проводи. Проте, як показало опитування, проведене серед водіїв тролейбусів депо м. Кременчук, іній є проблемою до 12 годин дня. Це пояснюється тим, що при виїзді першого тролейбуса частина інею дійсно видаляється з контактного проводу, а інша - розплавляється електричною дугою і перетворюється на воду, яка потім замерзає, утворюючи лід. І так триває до повного видалення інею з контактного проводу. У зв'язку з цим в умовах низьких температур необхідно встановлювати вставки, виготовлені з композиційного матеріалу. Середній ресурс таких вставок у 5...7 разів вище, ніж у вуглецевографітних [32, 33].

Проходження електричного струму через ковзний контакт «провід – самозмащувальний композиційний матеріал» у більшості випадків супроводжується істотною зміною фрикційних характеристик [34-38]. Для вуглецевографітних матеріалів збільшення струмового навантаження призводить до зменшення коефіцієнта тертя, тому у ряді випадків говорять про дію електричного струму, що змащує [38-42]. Аналіз наявних даних показує, що подібний характер впливу електричного струму на тертя найбільшою мірою властивий вуглецевографітним матеріалам. Проте, для багатьох марок металовмісних матеріалів падаюча залежність коефіцієнта тертя від густини струму менш виражена (іноді взагалі не виявляється) [43-46].

На підставі даних літератури [45, 47-52] можна визначити три основні види залежності коефіцієнта тертя від струму, які властиві для різних за природою контактних матеріалів. Розглянемо їх більш детально.

Для вуглецевографітних матеріалів найімовірнішою причиною зниження коефіцієнта тертя і збільшення зносу є теплова дія електричного струму. Згідно [53-56], локальні температури, що розвиваються на плямах контакту при проходженні струму призводять до ослаблення зв'язків між елементами

структури матеріалу в мікрооб'ємах, прилеглих до площадок реального контакту. У результаті полегшується процес руйнування поверхні контакту на частинах контактних плям, де реалізується мікрорізання. У той же час, модуль пружності даного матеріалу та визначальний розмір контактних площадок за пружної деформації, порівняно мало залежать від температури. Тому відсутній істотний вплив електричного струму на фрикційну взаємодію пари тертя при реалізації переважно пружного контакту.

Таким чином, основним чинником, що обумовлює прояв ефекту мащення для даної групи матеріалів, є те, що приводить до оборотного ослаблення його структури в мікрооб'ємах, прилеглих до контактних областей, і зменшенню роботи сил тертя на частини контактних плям, де реалізується режим мікрорізання. Одночасно знижується величина граничного напруження, що призводить до реалізації мікрорізання. У результаті разом із зниженням тертя в ковзному контакті виявляється інший ефект – збільшення інтенсивності зношування при збільшенні густини струму [57].

Згідно роботи [57], дослідження для матеріалів з низькою тепло- і електропровідністю, у яких моделюють вплив електричного струму на елементарні акти фрикційної взаємодії, показали, що для кожного типу матеріалу існує граничне значення густини струму на контактних плямах. Досягши граничної густини струму ширина доріжки тертя різко зростає, зникає чіткість її контурів, тертя стає нестійким. Очевидно, що в цьому випадку виділення джоулевого тепла призводить до руйнування зв'язуючого скелета матеріалу в області, яка прилегла до плями контакту, унаслідок чого втрачається його монолітність.

Для контактних матеріалів «гарячого пресування» з однотипним зв'язуючим (смоли фенол-формальдегідів) [64] значення критичного струму тим нижче, чим вище кількість зв'язуючого, тобто нижче тепло- і електропровідність.

Згідно результатів роботи [56], у разі даної групи матеріалів при густині струму вище за критичну, більшість контактних плям досягає значень, достатніх для інтенсивної деструкції зв'язуючого. Руйнування зв'язуючого

скелета в мікроб'ємах поверхневого шару, який прилеглий до контактних площадок, веде до ослаблення зв'язку між частинками наповнювача і їх більш легкого видалення, чим пояснюється інтенсифікація зносу. Зменшення величини опору на зсув матеріалу в поверхні є причиною зниження коефіцієнта тертя.

Таким чином, для композиційних матеріалів з низькою термічною стійкістю і електропровідністю фрикційна поведінка ковзного контакту визначається інтенсивністю руйнування зв'язуючого в поверхневому шарі контактного матеріалу під дією джоулевого тепла.

Фрикційна поведінка контактів з високим вмістом металевих компонентів (понад 90%) відрізняється від поведінки вуглецевих матеріалів [128]: практично не виявляється падаюча залежність коефіцієнта тертя від густини струму, при підвищених навантаженнях у ряді випадків тертя зростає. Характерно, що перехідні шари, які формуються такими струмознімальними елементами на поверхні контртіла, мають незначну кількість перенесеного матеріалу. Отже, в процесі ковзання велика вірогідність утворення контактних плям типу метал – метал. Очевидно, що в цьому випадку саме через металеві плями контакту передається основна частка електричного струму [80], і характер фрикційної взаємодії в межах таких плям визначає фрикційну поведінку множинного контакту в цілому.

Відповідно для пояснення особливостей поведінки фрикційних характеристик матеріалів даної групи, можна використовувати дані досліджень металевих контактів [58-60]. При густині струму на металевих контактних плямах до $10^3 \dots 10^4$ А/см² практично не спостерігається зміни величини як загального коефіцієнта тертя, так і його адгезійної і деформаційної складових. Проте при більш високих струмових навантаженнях ($10^4 \dots 10^6$ А/см² на контактних плямах) вплив електричного струму на тертя виявляється шляхом полегшення пластичної деформації поверхонь у сукупності з тепловою дією, що сприяє збільшенню фактичної площі контакту і коефіцієнта тертя [61-63]. При подальшому підвищенні струмового навантаження (до 10^6 А/см² і вище) посилюється і стає переважаючим теплова дія електричного струму, що веде до

розм'якшення поверхневих шарів, збільшення фактичної площі контакту і схоплювання взаємодіючих елементів.

Під час експлуатації та експериментів встановлено [58], що виникнення іскріння або дугоутворення в ковзному контакті завжди веде до додаткового зростання зносу. Автор роботи [45] прийшов до висновку, що при іскрінні збільшення зносу вуглецевографітних контактів відбувається двома шляхами: ерозією, в результаті термічної дії дуги і збільшенням механічного зносу, унаслідок підвищення шорсткості мідної поверхні.

Згідно [39, 64-67], електричні розряди, обумовлюючи розсіювання значних порцій енергії на малих ділянках поверхні контакту, провокують у прилеглих до них мікрооб'ємах зростання температури до значень, коли швидкість окислення стає однаковою зі швидкістю втрати матеріалу. При цьому, не всі втрати матеріалу обов'язково є результатом видалення газоподібних продуктів окислення.

Переважає окислення зв'язуючого може послаблювати структуру поверхневих шарів вставки, полегшуючи механічний знос [68, 69].

У роботах [70, 79] була проведена оцінка електроерозійної стійкості матеріалів ковзних контактів: визначалася втрата маси досліджуваних матеріалів після дії на них розрядів електродуг. Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати, що втрати маси можуть бути наслідком «теплого удару», що викликає термопружні напруження і викид матеріалу з поверхні шару, випаровування матеріалу під дією високих температур, що розвиваються в локальних ділянках поверхневого шару, краплинного викиду матеріалу під впливом високих температур, що розвиваються в локальних ділянках поверхневого шару.

Крім безпосередньої дії на ковзні контакти міського електротранспорту, іскри і дуги можуть викликати дисоціацію повітря в зазорі і формування реакційно-здатних речовин, таких, як атомарний азот, кисень, озон, які прискорюють хімічну ерозію композиційного матеріалу [14, 27]. Дисоціація водяних плівок електричними розрядами сприяє протіканню процесів електролізу, результатом яких може бути окислення металу при анодній

поляризації і, навпаки, відновлення воднем окисних плівок, що виділяється, на металевій поверхні при її катодній поляризації.

Рівень надійності ковзних контактів міського електротранспорту, оцінка технічного стану взаємодіючих деталей і визначення їх придатності до експлуатації є завданням технологічного процесу дефектації [29]. Дефектом називають кожну окрему невідповідність деталі вимогам, встановленим нормативною документацією. В технічних умовах на дефектацію зазначаються два види оцінювальних параметрів [34], тобто критеріїв технічного стану деталі: критерій допустимого подальшого використання деталей, який забезпечує ресурс до наступного технічного обслуговування чи ремонту, та критерій граничного стану, за яким деталь не може встановлюватись на електротранспорт, таку деталь ремонтують якщо це технологічно можливо, або бракують якщо вона не піддається відновленню.

Стан деталей під час дефектації оцінюється наступними способами: оглядом – для визначення загального стану деталі; лінійним інструментом – для визначення розмірних дефектів; спеціальними приборами та пристосуваннями – для оцінки фізико-механічних властивостей деталі; гідравлічні та пневматичні випробування – для виявлення тріщин, нещільностей; дефектоскопія – для виявлення прихованих дефектів та мікротріщин.

Для ковзних контактів міського електротранспорту, а саме для вставок струмоприймачів на рис. 1.5 наведено розподіл ресурсу для існуючих дефектів. Математико-статистичні дані було взято у Кременчуцькому тролейбусному управлінні та оброблені у прикладному пакеті «Statistica».

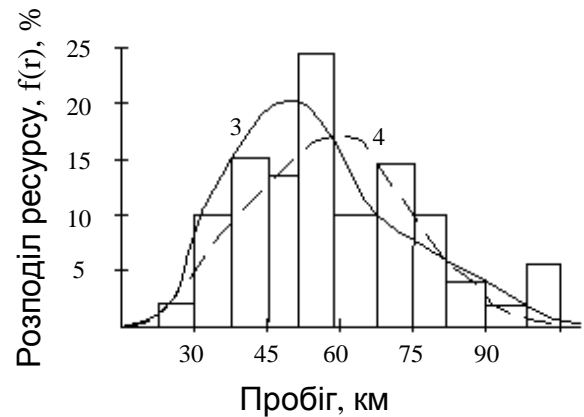
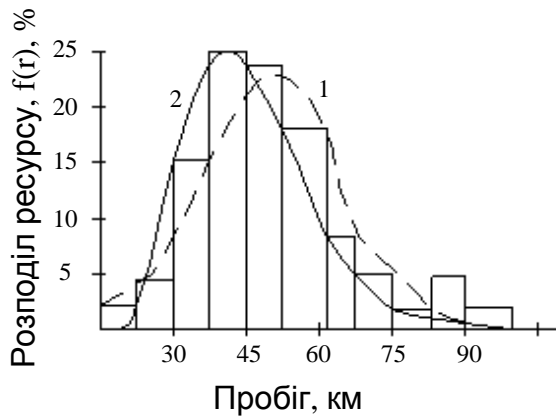


Рисунок 1.5 – Розподіл ресурсу вставок струмоприймача тролейбусів при дефектах: 1 – сколювання бічної поверхні вставки під контактний провід; 2 – знос поверхні вставки під контактний провід; 3 – підпали вставки; 4 – тріщини вставки

Технологічний маршрут ремонту вставки та можливі дефекти наведено в додатку (Додаток А, рис. А.1). Тобто, за прийнятим маршрутом установлення вугільної вставки на струмоприймач міського електротранспорту, повинні бути усунені такі види дефектів:

- знос поверхні вставки під контактний провід;
- сколювання бічної поверхні вставки під контактний провід;
- тріщини вставки;
- підпали вставки.

Для усунення дефекту “знос поверхні вставки під контактний провід”, необхідно прийняти варіант технологічного процесу, що передбачає виконання такої операції, як заміна вставки новою [138].

Для усунення дефекту “сколювання бічної поверхні вставки під контактний провід” необхідно використати варіант технологічного процесу, що передбачає виконання такої операції, як запилювання надфілем до утворення потрібної площинності [68].

Для усунення дефекту “тріщини вставки”, повинен бути прийнятий варіант технологічного процесу, що передбачає виконання такої операції, як усунення тріщини запилюванням надфілем [68].

Для усунення дефекту “підпали вставки”, застосовується варіант технологічного процесу, що передбачає виконання такої операції, як зачищення [68].

Маршрутна карта усунення дефектів вугільної вставки наведена у Додатку А, табл. А.1.

1.3 Основні напрямки підвищення надійності експлуатації ковзних контактів

1.3.1 Загальна характеристика методів підвищення надійності ковзних контактів

Надійність ковзного контакту "вставка струмоприймача – контактний провід" можна підвищити конструкційними, технологічними і експлуатаційними методами або застосуванням їх комбінацій.

Конструкційні методи застосовують при удосконаленні існуючих та впровадженні нових конструкцій вставок струмоприймачів чи контактних проводів або обох складових. На сучасному етапі розвитку за допомогою даного методу розробляються більш складні рішення стосовно ковзного контакту.

Технологічні методи потребують ряд заходів, що стосуються запропонування нового складу матеріалів існуючих елементів ковзного контакту "контактний провід – вставка струмоприймача" та зміни технологічного процесу виготовлення чи модифікування його елементів. Такі методи надають можливість підвищити його електро- та триботехнічні, фізико-механічні та антикорозійні властивості.

При експлуатаційних методах підвищення надійності ковзних контактів застосовують оптимізацію експлуатаційних режимів міського електротранспорту, а також застосовують різні способи зниження електроопору і сил тертя в контакті. Це досягається підвищенням точності регулювання

контактної підвіски, оптимізацією статичного натиснення струмоприймача міського електротранспорту і підтримкою контактної мережі в належному стані.

Через те, що ковзний контакт "контактний провід – вставка струмоприймача" сприймає вплив коливань, температури, вологості навколишнього середовища і сили вітру, то в таких умовах неможливо забезпечити постійність подачі мащення в зону ковзного контакту з метою зниження зносу цієї системи тертя. Це означає, що матеріали ковзного контакту повинні володіти високою зносостійкістю в умовах сухого тертя.

Аналіз літературних джерел [25, 26, 28, 29, 61, 67] показав, що наукові думки спрямовані на розробку нових досконаліших матеріалів для ковзних контактів, які набули бурхливого розвитку у кожній розвинутій країні світу.

1.3.2 Напрямки підвищення надійності ковзних контактів

У результаті проведеного патентного пошуку виявлено, що відомими є електричні ковзні контакти на основі вуглецю з різними добавками і шаруваті щітки на основі почергово розміщених шарів вуглецевих тканин і полімерних зв'язуючих з антифрикційними добавками і перпендикулярним розміщенням шарів відносно осі контр-тіла [48]. Такі елементи не забезпечують створення суцільної проміжної плівки (політури) між взаємодіючими матеріалами, мають низьку зносостійкість, погану комутацію, що призводить до підгоряння контр-тіла. З метою підвищення зносостійкості і поліпшення комутаційних властивостей запропоновано шаруватий матеріал [69] з розміщенням подібних шарів у площині, перпендикулярній до вісі контртіла, під кутом $75...80^\circ$.

Відомі також струмознімальні вставки, що містять елементи з капілярними отворами і резервуар із струмопровідною рідиною [36], виготовлений у вигляді двоступеневої циліндричної втулки, заповненої струмопровідною рідиною і притиснутою до контртіла пружиною [49], а також подібний до останнього пристрій [57], у якому втулка з рідиною виготовлена у вигляді поршня з ущільнюючими кільцями і встановлена в корпус з

можливістю зворотно-поступального переміщення, що дозволяє утримувати постійний тиск рідини і постійне зусилля притискання струмознімального елемента до контртіла.

Ковзний контакт [65] відрізняється наявністю двох паралельно працюючих елементів, які жорстко закріплені у тримачі і ковзають за заглиблення контртіла, зміщених одне відносно іншого на відстань, яка більша за тангенціальний розмір елемента. При підході першого елемента до кільцевої проточки контакт з колектором розмикається і в контакт вступає друга щітка. При повороті на 180° у контакт вступає перший елемент, а контакт з другим – розмикається. Така конструкція контакту забезпечує його надійну працездатність за рахунок зниження температури контактних поверхонь і поліпшення умов видалення продуктів зносу із робочої площини взаємодіючих елементів.

З метою гарантії надійного контакту між щіткотримачем і щіткою струмознімального пристрою у щіткотримачі додатково передбачають еластичні елементи [74], а для рівномірного розподілу струму між паралельними щітками і рівномірного їх спрацьовування, окрім корегуючих пружин кожної щітки передбачена спільна для обох щіток планка, яка притискається окремою пружиною до корпусу щіткотримача [90].

Для електричних машин постійного струму, які працюють в одноразовому режимі і з робочими струмами великої густини, з метою зменшення іскроутворення використовують струмознімальні елементи, утворені секціями скруток, ізольованих струмопровідних жил з металевого проводу низького електричного опору, наприклад, берилійової бронзи [92]. Секції розміщені паралельно до контртіла і кожна з них з'єднана з певним резистором. Електричний опір резисторів збільшується у бік збігаючої кромки струмознімального елемента. Зубчастий профіль торця корпусу струмоприймача утворений нахилено розміщеними площинами під певним кутом, який визначається за умови оптимізації величини зміщення робочих кінців жил у тангенціальному напрямі. Наведена конструкція забезпечує

надійну роботу ковзного контакту за густини робочого струму 2000 A/cm^2 і більше.

Для електричних машин, умови роботи яких відрізняються особливою напруженістю струмознімальних пристроїв через вібрацію і великі струми, з метою підвищення зносостійкості взаємодіючих елементів рекомендовані матеріали з різними фізико-механічними характеристиками, які розміщуються з урахуванням полярності: елементи з одного матеріалу встановлюються у тримач позитивної полярності, а з іншого – у тримач негативної полярності [102], а також елементи, які містять основну частину і бокові накладки з боку збігаючого і набігаючого країв. За таких умов найвищу зносостійкість і кращу комутацію забезпечують елементи, у яких основна частина і накладки виготовлені з прес-порошку одного складу, але мікротвердість бокових поверхонь (накладок) у 1,2...3 рази більша мікротвердості основної частини [115].

Висока здатність комутації, зносостійкість і мінімальні енергетичні втрати у контакті мають елементи на основі кристалічного графіту з анізотропією електричного опору [119], а також елементи, які містять вуглецеві тканини, термореактивні зв'язуючі речовини та антифрикційні складові. Основним недоліком таких елементів є їх неспроможність повністю уникнути поперечного струму. Такого недоліку позбавлені елементи, які містять ізольовані один від одного і від тримача прошарки електропровідного матеріалу, наприклад вуглецевої тканини, які просочені термореактивним зв'язуючим і на їх протилежному від робочих поверхонь торці нанесено напівпровідниковий шар, а товщина прошарків менше товщини міжшарової ізоляції [122].

Відомі також [45] способи струмознімання зі стабілізацією перехідного опору ковзних контактів, які полягають у ретельному притиранні вставок і систематичному контролі за їх станом і величиною натискання, а також з різними складом матеріалу і способами їх просочування. Кожний з відомих заходів конструктивного виконання не вирішує задачу зменшення величини перехідного опору і втрати потужності струмознімання.

Оптимізація складу і гранулометричних параметрів композиції шихтових матеріалів – основний напрям досліджень струмознімальних ковзних елементів, які проводяться з метою поліпшення їх комутативних властивостей і зносостійкості. Зупинимось на цьому питанні і проведемо аналіз літературних джерел.

Щітки для електричних машин [5] виготовлені з сажі і пеку різного гранулометричного складу (з розмірами частинок більше 250 мкм – 0,5...2,5 %, 63...250 мкм – 30...40 %, менше 63 мкм – решта) не забезпечують високу стабільність експлуатаційних характеристик окремих партій, що зумовлено практичною неможливістю сажопекових композицій за відомих принципів формування забезпечити їх однорідність у процесі змішування. Уникнути цього недоліку можна введенням у порошок поверхнево-активних речовин (ПАР) у кількості 0,5...2,5 % від ваги прес-порошку. ПАР вступають у фізичну взаємодію з сажею, якій властива висока питома густина і запобігають її грудкуванню. При вмісті ПАР менше 0,5 % втрачається ефект змочування сажі, а більше 2,5 % відбувається перезволоження маси і розтріскування виробу під час термообробки.

Встановлено [5], що знос щіток з такого матеріалу на тепловозних генераторах не перевищує 0,9...1,2 мм, а для серійних щіток – 1,5...3,0 мм на 10 тис. км пробігу.

Відомий матеріал [3], який містить технічний вуглець з розмірами частинок менше 63 мкм і вуглецевий агломерат з розмірами частинок до 500 мкм та пек. Оскільки розміри частинок складових прес-порошку різні, то при випалюванні відпресованих блоків утворюються мікротріщини і при підвищенні швидкості ковзання з'являються вібрації, іскріння та інтенсивне зношування. За наявності технічного вуглецю ковзний контакт схильний до електричної ерозії і окислення в умовах підвищених швидкостей та температур.

Запропонований склад прес-порошку [123], як вуглецевий компонент містить натуральний малозольний графіт (70...76 %), мідь (7...10 %) і пек (17...20 %). Гранулометричний склад графіту становить: 0,5...1,0 % з розмірами частинок більше 160 мкм; 29,0...45,5 % з розмірами частинок

63...160 мкм; 50,0...70,0 % з розмірами частинок менше 63 мкм. Мідь, як каталізатор підвищує пружність контакту. Дрібнодисперсний склад графіту забезпечує рівномірний розподіл зв'язуючого (пеку) між частинками графіту та міді, однорідність структури і вібростійкість.

Для виготовлення ковзних контактів електротранспорту, які працюють в умовах високих значень пускових струмів і вібрацій використовують прес-композиції, які містять вуглецевий і деревний наповнювачі та зв'язуючі речовини [127]. Деревний наповнювач забезпечує політуроутворення у контакті, зменшує мікротвердість матеріалу струмознімального елемента та запобігає зношуванню контр-тіла. Розміри частинок деревного наповнювача значно перевищують розміри вуглецевої складової, а тому механічний зв'язок між окремими частинками виявляється надто слабким. Тому, у загальному випадку, кількість деревного наповнювача обмежується і не перевищує 2...4 % маси прес-матеріалу.

Зменшити ерозію ковзних контактів можна на основі регулювання процесу політуроутворення, використовуючи прес-композицію з 5...40 % деревного і 60...95 % вуглецевого наповнювача, які утворюють гранули [126]. Відношення розміру частинок вуглецевого і деревного наповнювачів вибирають у межах 0,8...1,2. Це забезпечує компенсацію негативної дії на політуру контр-тіла частинок вуглецевого наповнювача, наділеного високою мікротвердістю, і достатню зносостійкість струмознімальних контактів. У випадку вмісту деревного наповнювача більше 40 % зростають втрати на тертя, а менше 5 % погіршується ефект політуроутворення і збільшується знос контртіла.

Відомий матеріал струмознімального ковзного елемента [125], який містить сформовані у гранули, за допомогою зв'язування розчином бакелітового лаку обміднений матеріал (графіт і деревне вугілля) і органічне зв'язуюче (фторопласт до 30%), наділений високим питомим опором, низькою твердістю і зносостійкістю.

Існує струмознімальний ковзний елемент, виготовлений з прес-порошку обмідненого вуглецемісного матеріалу та органічного зв'язуючого [125], прес-

матеріал якого являє собою графітовий порошок, на поверхню частинок якого нанесений шар електролітичної міді, а на шар міді нанесений захисний шар олова. Як органічне зв'язуюче використовують порошок політетрафторетилену до 50%. Як вуглецевомісний матеріал використовують також графіт і деревне вугілля, а зв'язуюче – фторопласт (до 30%), які сформовані у гранули розчином бакелітового клею. На поверхню гранул нанесено шар електролітичної міді Недоліком такої композиції є високий електричний опір та низькі властивості (твердість, міцність, зносостійкість).

Зміцнення і підвищення електропровідності системи вуглецевомісний матеріал – зв'язуюче забезпечує прес-порошок, який включає обміднений вуглецевомісний матеріал, як суміш графіту і загартованого коксу при їх співвідношенні (2...4):1, причому мідь введена у вигляді шару покриття, нанесеного на частки загартованого коксу [127], а концентрація компонентів у прес-порошку складає: графіт 50...65 %, кокс загартований 12...25 %, мідь 4...10 %, решта – зв'язуюча речовина.

Згідно [17], поперечний перетин вставки повинен мати прямокутний профіль, а краї жолоба підведені, останнє забезпечує краще використання матеріалу вставки. Великий вплив на термін служби вставки має форма профілю – її західна частина і ширина. На підставі даних [16] рекомендується профіль торцевої частини вставки робити у вигляді площини, нахиленої під кутом 70° до горизонту, а ширину вставки – 28 мм При такому профілі і ширині вставка найменше схильна до розколювання. Довжина вставки повинна бути не більше 84 мм. У плані більшість вставок мають вид прямокутника. На рис 1.6. приведені види вставок, що використовуються в теперішній час.



Рисунок 1.6 – Різновиди тролейбусних вставок.

За типом матеріалу вставки діляться на металеві, металеві самозмащувальні, вуглецевографітні і композиційні [17].

Розглянемо більш детально всі типи вставок.

До позитивних якостей металевих вставок слід віднести міцність, зносостійкість, високу електропровідність. Проте, у даний час металеві вставки практично не застосовуються.

Основними причинами, що спонукали відмовитися від застосування металевих вставок, є порівняно великий знос контактного проводу і додаткові експлуатаційні витрати, які пов'язані з необхідністю їх мащення. Крім того, при використанні металевих вставок спостерігається більш інтенсивне іскріння і дугоутворення. Звичайно для струмознімання на електротранспорті застосовуються вставки, виконані з чавуну, сталі і сплавів алюмінію.

Як показав досвід експлуатації алюмінієвих вставок [17], на їх знос негативно впливають знижені температури, іній і паморозь, що утворюється на проводах. В цих умовах робота вставок супроводжується надто інтенсивним іскрінням і дугоутворенням. Крім того, відбувається оплавлення контактної поверхні, яке викликає катастрофічно швидкий знос вставки і контактного проводу. Також, у процесі експлуатації алюмінієвих вставок відбувається намазування матеріалу вставки на контактний провід, що у свою чергу

призводить до схоплювання однорідних матеріалів з подальшим вириванням, що призводить до погіршення якості поверхні тертя і збільшення механічного зносу.

Згідно [18, 19] при експлуатації металевих вставок рекомендується обов'язкове мащення контактних проводів. Як показали численні експерименти [17], за відсутності мащення на контактній поверхні проводу і металевій вставці з'являються глибокі каверни, нерівності і сліди електричних дуг, які утворюються унаслідок наволочення металу. Такий стан поверхні призводить до збільшеного тертя і посиленого іскріння, внаслідок чого, спостерігається підвищений знос вставок і проводу. Експлуатація металевих вставок без мащення контактних проводів недопустима.

Проте, зважаючи на складність конструкції механізму нанесення мащення на контактний провід і неможливості використання мащення при низьких температурах (нижче -20°C), а також у зв'язку з додатковими витратами на експлуатацію контактної мережі, сьогодні від мащення контактного проводу відмовилися в більшості тролейбусних парках світу. А, оскільки, металеві контактні вставки при експлуатації без мащення інтенсивно зношують контактний провід, то вони в даний час, практично, не використовуються.

Великі витрати і незручності, які пов'язані з мащенням контактного проводу, стали причиною створення таких металевих вставок, які самі подавали би мащення до ковзного контакту у міру свого зносу.

У роботі [17] наголошується на тому, що, якщо до поверхні тертя ввести тверде мащення, то коефіцієнт тертя і знос зменшуються в порівнянні з тертям сухих пар. Це явище можна пояснити тим, що введене мащення заповнює дрібні нерівності на поверхні тертя, збільшує опорну поверхню і виступає металевим мащенням. У момент перевантаження окремих контактних площадок мащення добре поглинає утворюване тепло, зменшуючи тим самим можливість контактного зварювання окремих контактних поверхонь і запобігає ударам проводу і вставки. Графіт, який введено у контактну поверхню може також надавати аналогічну дію [20].

Звичайно [18] застосовуються вставки, виготовлені з дюралюмінію з упресованими мідно-графітними стрижнями; силуміну з вуглецевографітовими і свинцевими стрижнями, що змащують; алюмінієві стрічки і графітне мащення; суміші алюмінієвої стружки і вуглецевографітного порошку зі зв'язуючим у вигляді смоли.

Результати експлуатації показали [17, 18], що вставки даного типу мають недостатню зносостійкість. При сухому контакті спостерігаються задирання контактних поверхонь, особливо контактного проводу. Тому подібні самозмащувальні вставки не відповідають вимогам експлуатації і не можуть застосовуватися без додаткового мащення контактного проводу.

Вуглецевографітні вставки отримали досить широке розповсюдження. При правильному підборі складу і технології виготовлення вони якнайповніше задовольняють всі вимоги експлуатації. До основних їхніх переваг потрібно віднести: малий знос контактного проводу, здатність змащувати контактну поверхню і підтримувати її в полірованому стані, зменшення іскріння і шуму, що виникає при русі струмоприймача електротранспорту по спецчастинах контактної підвіски, а також перешкод радіоприйому, зниження експлуатаційних витрат [21].

Недоліками вуглецевографітних вставок є: залежність зносостійкості від стану поверхні контактного проводу і чутливість до вологи та ожеледі.

Термін служби вставок можна збільшити за рахунок зниження питомого натиснення їх на контактний провід [22]. Це можливо за наявності оптимально сконструйованих спецчастин і еластичних систем підвіски. Дослідним шляхом встановлена [18, 23] неприпустимість сумісної експлуатації вуглецевографітних вставок з металевими через пошкодження останніми полірованої поверхні контактного проводу. Доцільне лише попереднє накочення ліній, що знов відкриваються, сталевими, а для досягнення кращого результату, композиційними вставками протягом 1-2 днів. Це дає можливість швидше зняти з мережі окремі нерівності і закотити провід вуглецевографітними вставками. Для прискорення накочення випускаються також спеціальні

вуглецевографітні вставки, що володіють високими абразивними властивостями.

У вологий період року можлива заміна вуглецевографітних вставок композиційними [17]. У загальному випадку вуглецевографітні вставки рекомендується використовувати тільки при нормальних умовах експлуатації міського електротранспорту.

Згідно опублікованим даним [24] до складу композиційних вставок входять найбільш доступні для масового застосування матеріали: залізо (пористе); залізо і мідь; залізо і графіт; залізо, мідь і графіт; мідь і графіт; мідь, свинець і графіт; алюміній і графіт; залізо, мідь, свинець, графіт.

Властивості композиційних матеріалів у великій мірі залежать від їх пористості, крупності порошку, структури, технології виготовлення і хімічного складу [25].

Установлено [26], що механічні властивості композиційних матеріалів при зменшенні пористості підвищуються. Так, при зменшенні пористості на 1% механічні властивості підвищуються на 3...10%. При виборі пористості необхідно зважати на те, що для вставки бажано мати високу пористість з точки зору забезпечення кращого мащення контактного проводу і меншого його зносу.

Металокомпозиційні матеріали, які виготовлені з тонких порошоків, мають вищі механічні властивості, ніж матеріали, виготовлені з грубих порошоків [27].

З метою поліпшення антифрикційних властивостей і запобігання від окислення, вставки піддають просоченню [28]: солідолом; сумішшю автолу з парафіном в співвідношенні 1:1; сумішшю автолу з парафіном в співвідношенні 1:1 з присадкою 0,5% органозоля заліза. Вставки просочують мащенням при температурі 120-130°C протягом 3 годин. Просочення мащенням, що містить органозоли заліза, здійснюють у вакуумі. Після просочення вставки охолоджують у холодному мастилі.

За наслідками випробування вставок [18], виготовлених з пористого заліза, працюючих із сухим незмазаним контактним проводом зроблені наступні висновки:

- зносостійкість вставок, просочених вказаними речовинами і взаємодіючих із незмазаним проводом, недостатня. Просочення вставок не оберігає контактні поверхні вставки і проводу від задирів;

- вставки при однаковій пористості мають менший знос, якщо до просочення додаються органозоли заліза.

При додаванні міді до пористого заліза підвищуються міцність матеріалу і опір зносу [29]. Згідно [18] були проведені випробування вставок, виготовлених з пористого заліза (пористість 40 і 50%), просочені міддю, із заповненням 50 і 100% об'єму пор. Вставки, у яких заповнено міддю 50% об'єму пор, просочувалися мастилом, що складається з 50% автолу і 50% парафіну. Установлено, що просочення міддю підвищує опір зносу у декілька разів [30], але не усуває задирання контактних поверхонь.

До складу вставок, що складаються із заліза і міді, були введені графіт в кількості 3...4% і 10% свинцю [18]. Задирання контактних поверхонь припинилися, питомий знос вставки став прийнятним для експлуатації.

Випробовувалися також вставки [18], які виготовлені з порошків алюмінію і графіту, які також не дали позитивних результатів.

На підставі наведених вище результатів випробувань можна зробити висновок, що для експлуатації найбільшою мірою підходять композиційні вставки на основі заліза з добавкою міді, свинцю і графіту.

На підставі джерела [17] композиційні вставки можуть бути використані в екстремальних умовах (низькі температури, підвищена вологість повітря, утворення інею на проводах, незадовільний стан контактної підвіски тощо). Крім того, композиційні вставки можна використовувати для накоплення ліній, які наново відкриваються, а також для зачистки контактного проводу від чужорідного матеріалу і згладжування слідів дії електричної дуги після зимового періоду експлуатації. У вологу погоду рекомендується замінювати вуглецевографітні вставки композиційними.

Українські виробники запропонували такого роду вставки, під маркою ВКТ-М, характеристика яких наведена в технічних умовах ТУ У 14111810.003-96, а експлуатаційні характеристики таких вставок при роботі у парі з мідним

проводом МФ-100 наведено в Додатку (Додаток А, табл. А.2). Можна твердити, що розрахункова величина інтенсивності зносу в поперечному перерізі проводу МФ 100 при взаємодії з вставками ВКТ-М така сама, як для пари провід МФ-100 – вставка ВКТ і складає $\sim 1,0...1,2\%$ від припустимої $0,3 \text{ мм}^2/10000$ проходів згідно ГОСТ 2584-86, а зносостійкість вставки ВКТ-М залежно від вологості контакту перевищує аналогічний показник для графітової вставки типу ВКТ у 15...20 разів і у 2...4 рази для металокерамічних вставок інших виробників [27].

Звертаючись до досвіду залізничників, зокрема на Московській залізниці [29], можна зробити висновок, що використання на електрорухомому складі постійного струму порошкових контактних вставок на основі заліза (ВЖЗП) дозволяє знизити знос контактного проводу на 50% та підвищити пробіги полозів у 2 рази в порівнянні з мідними монолітними вставками. Ці вставки виготовляються з композиційного матеріалу з гетерогенною структурою. Механізм зношування зводиться до мікросхоплення. На поверхні проводу з'являються вторинні структури, які насичені залізом. Це значно підвищує твердість поверхневих шарів контактного проводу і призводить до зниження величини його зносу. Подальше удосконалення порошкових вставок – виготовлення їх у біметалічному виконанні [29, 67]. Зміна хімічного складу дозволяє підвищити пробіги полозів струмоприймачів ще удвічі та знизити знос контактного проводу на 30 – 40%. Це досягається в результаті введення в композиційний матеріал вставки більшої кількості твердого мащення, а міцність не знижується завдяки їх біметалічній конструкції. Хімічно-активне тверде мащення взаємодіє з металами проводу та струмознімальними вставками, утворюючи при цьому на поверхні контактів різні хімічні з'єднання. Інтенсивне утворення вторинних структур дозволяє попередити схоплення поверхонь контактів, оскільки відсутні ювенільні поверхні металів в місцях їх контактування [12, 65, 67].

Для підвищення зносостійкості струмознімальних вставок і зниження їх питомого опору, які б нормально працювали при будь-яких експлуатаційних і кліматичних умовах, в Росії та інших країнах світу пішли шляхом використання

металовуглецевих матеріалів. Такі вставки повинні об'єднувати в собі високі самозмащувальні властивості вуглецю і провідні властивості металу. Тому в якості металічної складової використовується мідь і її сплави, а в якості вуглецевої – в основному кокс, іноді – графіт [44].

Перевага вуглецево-мідних матеріалів полягає в тому, що провідні властивості можна змінювати в широкому діапазоні варіюванням складу міді в матеріалі, наприклад в матеріалі MY7D (Великобританія) при збільшенні складу мідного сплаву з 35 до 55% (мас.), питомий електроопір упав з 8 до 1,4 мкОм·м [66].

При збільшенні металеві складової збільшується ймовірність схоплювання струмознімального матеріалу з контактним проводом, що призводить до підвищення інтенсивності зношування обох контактів [26, 61]. Основним недоліком подібних матеріалів є відсутність фізико-хімічної взаємодії вуглецю з міддю. У додатку, табл. А.3 наведені основні властивості вставок на основі вуглецю.

У роботі [67], в якості основи нового графітомідного матеріалу, вибрали природний графіт, а в якості зв'язуючого і зміцнювача – піролітичний графіт. Автори базувались на тому, що природній графіт є найбільш інертним вуглецевим матеріалом стосовно окислення при нагріванні і має кращі самозмащувальні властивості, ніж кокс і штучний графіт. В новому матеріалі – мідь змочує графіт, що досягається завдяки модифікуванню графіту металами 4...6-х груп таблиці Менделєєва. Кращим модифікатором виявився ніобій. Пробіг полозу з дослідними графітомідними вставками з ніобієм склав 365 тис. км.

В Росії, фірма "Техма" освоїла виробництво контактних матеріалів на мідній основі з високою жароміцністю. Завдяки деформаційному легуванню і внутрішньому окисленню на базі порошкової металургії створені композити, у яких температура рекристалізації складає 800 – 1000°C, твердість НВ 250, а електропровідність досягає 90% електропровідності міді. Насичення матеріалу такого виду твердими мащеннями дозволить отримати струмознімальні елементи з високими характеристиками [67]. Перспективним є введення в такий

композит вуглецю у вигляді графіту і його модифікацій – фуллеренів і астринів, що представляють собою нанодисперсійні частинки фуллероїдного типу (нанотрубки і астрини). Специфічність електронної будови нових алотропних модифікацій вуглецю надає цим матеріалам незвичні фізико-механічні властивості. Це дозволяє розглядати їх, як перспективні модифікатори для створення композитів з підвищеними електричними, триботехнічними і механічними властивостями [67].

1.4 Висновки. Мета та задачі досліджень

Встановлено, що найбільше відмов систем міського електротранспорту припадає на електричне обладнання, які складають 42...52%. При цьому, кількість відмов струмоприймачів складає 35% від загальної кількості та здебільшого проявляються в процесі експлуатації. Крім того, значний внесок у загальні відмови струмоприймачів роблять ковзні контакти, ресурсні відмови яких сягають 90%.

За показником надійності середнім ресурсом ковзні контакти знаходяться на останньому місці серед сукупності деталей та елементів міського електротранспорту. Враховуючи специфіку експлуатації, а також недосконалість технології виготовлення ковзних контактів міського електротранспорту останні повинні володіти високою надійністю та довговічністю.

Аналіз конструкторсько-технологічних методів свідчить про складність та невирішеність проблеми вибору раціонального матеріалу для ковзних контактів за критерієм надійності. Такий матеріал повинен зберігати надійність струмознімання та не викликати інтенсивного зношування контактного проводу, для чого потрібно, щоб він володів низкою суперечливих несумісних властивостей. При цьому необхідно забезпечувати: високі механічні та триботехнічні властивості, низькі питомий та перехідний електроопір, високу електроерозійну стійкість і надійну роботу в різних кліматичних умовах.

Особливий та основний вплив на зносостійкість здійснює склад матеріалу, який проявляється в спроможності утворювати дисипативні структури при терті зі струмоznіманням, тобто в склад струмоznімального матеріалу ковзного контакту повинні входити речовини, які забезпечують проходження неврівноважених процесів на поверхнях тертя. Подальше удосконалення ковзних контактів можливе, якщо використовувати композиційні матеріали на мідній основі і, які повинні бути "всепогодними", мати ходовість не менше 2 днів (у середньому 500 км пробігу), а вартість вставок повинна бути обґрунтована з огляду на техніко-економічні та техніко-експлуатаційні критерії.

На підставі представленого вище встановлено, що метою роботи є підвищення надійності експлуатації ковзних електричних контактів міського електротранспорту, шляхом впровадження матеріалів, які володіють підвищеними фізичними, електро- та триботехнічними властивостями. Для реалізації поставленої мети необхідним є розв'язання наступних задач:

- проаналізувати особливості роботи ковзних контактів міського електротранспорту, основні напрями підвищення їх надійності експлуатації;
- побудувати математичну модель динаміки зношування ковзних контактів;
- теоретично обґрунтувати можливість підвищення надійності експлуатації ковзних контактів міського електротранспорту;
- розробити контакти з матеріалів, які мають підвищені властивості;
- дослідити фізичні, електро- та триботехнічні властивості розроблених ковзних контактів;
- провести стендові та експлуатаційні випробування розроблених ковзних контактів, з урахуванням вимог експлуатації, міського електротранспорту;
- дати оцінку техніко-економічної ефективності застосування запропонованих ковзних контактів.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ КОВЗНИХ КОНТАКТІВ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

2.1 Теоретичні передумови

З теоретичної точки зору динаміка зношування елементів ковзних контактів як міського електротранспорту, так і іншого остаточно не розкрита. Не отримано рівняння, яке пов'язує фізико-механічні, електро- та триботехнічні характеристики ковзних контактів та умови експлуатації міського електротранспорту, відсутні математичні моделі, які б описували процес зносу при взаємодії контактного проводу та струмознімальних вставок.

Математичне моделювання й розкриття основних закономірностей динаміки зношування ковзних контактів й формування їх оптимальних властивостей є найважливішою задачею в проблемі підвищення їх надійності та ефективності експлуатації [10, 11].

Процес побудови фізичних та математичних моделей передбачає наступні етапи:

- накопичення та обробка бази даних про домінуючі процеси, які протікають у ковзних контактах і представлення її в більш компактній формі;
- оцінка впливу технологічних та експлуатаційних факторів на досліджувані процеси та визначення підходів цілеспрямованого впливу на процеси взаємодії ковзних контактів;
- прогнозування, а також забезпечення розвитку і саморозвитку процесів, що протікають у взаємодіючих поверхнях ковзних контактів міського електротранспорту.

Зношування взаємодіючих елементів ковзних контактів є незворотним дисипативним процесом, що протікає з витратою зовнішньої енергії [22, 23].

Вставки струмоприймачів, пристосовуючись до умов взаємодії з контактним проводом, поступово зношуються під впливом механічної та електричної складової. При цьому відбувається зниження густини прикладеної зовнішньої енергії, а робочі поверхні ковзних контактів набувають деякої стабільної та оптимальної форми.

Відомо [22], що тертя і зношування взаємодіючих поверхонь ковзних контактів є випадковим процесом, який обумовлений зміною їх геометричних розмірів. На основі класичної схеми протікання процесу з мікроскопічної точки зору [36], зношування робочих поверхонь ковзних контактів можна описати стохастичним диференціальним рівнянням:

$$\frac{dU}{dt} = \varphi(U, t) + \psi(U, t)\xi(t), \quad (2.1)$$

де $U(t)$ – функція відносного зносу, $U(t) = \frac{u(t)}{u_{zp}}$; $u(t)$ – поточний знос;

u_{zp} – граничний знос; $\varphi(U, t), \psi(U, t)$ – детерміновані функції, що характеризують інтенсивність зносу; $\xi(t)$ – випадкова складова; t – тривалість процесу зносу.

Випадкова функція $U(t)$ описує безперервний марківський процес [58], якщо функція $\xi(t)$ включає незалежні випадкові величини.

При цьому, випадковий марківський процес [58] повністю визначається щільністю ω умовної ймовірності переходу. У загальному вигляді ймовірність задовольняє узагальнене інтегральне рівняння Маркова, яке при певних припущеннях, зазначених у роботі [58], зводиться до рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{\partial a(U, t)\omega}{\partial U} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 b(U, t)\omega}{\partial U^2}, \quad (2.2)$$

де $a(U,t)$, $b(U,t)$ – відповідно коефіцієнти, які описують середню швидкість випадкового процесу зношування $u(t)$ та характеризують швидкість зміни умовної дисперсії цього процесу.

У цьому випадку, щільність розподілу ресурсу визначається величиною зносу для однорідного марківського процесу [58]:

$$f(t) = \int_0^{\infty} g(t)\gamma(t-t_0)dt, \quad (2.3)$$

де $g(t)$ – щільність розподілу ймовірності перетину досліджуваного процесу критичним рівнем (допустимим значенням зносу):

$$g(t) = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^1 (U_0, t_0, U, t), \quad (2.4)$$

$\gamma(t-t_0)$ – щільність розподілу початкового етапу процесу зношування.

Отже, щоб визначити закон розподілу необхідно розв'язати рівняння (2.2) і (2.4).

2.2 Математична модель динаміки зношування ковзних контактів

Оскільки ресурс ковзних контактів міського електротранспорту визначається передусім величиною зносу, то розглянемо можливість визначення закону розподілу за величиною зносу вставок струмоприймача. Припустимо, що зміну середнього значення зносу та його дисперсії можна описати лінійною залежністю. При цьому рівняння кінетики зношування матиме вигляд [61]:

$$\frac{dU}{dt} = I_1 + I_2 \xi(t), \quad (2.5)$$

де I_1, I_2 – сталі величини, що характеризують інтенсивність детермінованої і випадкової складової процесу зношування вставок струмоприймача. Величину зносу деякого елемента робочої поверхні вставок струмоприймача можна уявити як різницю випадкових процесів:

$$\Delta u(\Delta t) = u\left(\frac{S}{t_1}\right) - u\left(\frac{S}{t_2}\right), \quad (2.6)$$

де $u\left(\frac{S}{t_1}\right), u\left(\frac{S}{t_2}\right)$ – відповідно випадкові функції, що характеризують знос деякого елемента робочої поверхні вставок струмоприймача у відповідні моменти часу t_1, t_2 ; $\Delta t = t_1 - t_2$ – час, який необхідний на протікання процесу зношування деякого елемента робочої поверхні вставок струмоприймача; S – шлях тертя.

Математичне очікування і дисперсія при цьому, відповідно до рекомендацій [58], матимуть вигляд:

$$M_u = M\left[u\left(\frac{S}{t_1}\right)\right] - M\left[u\left(\frac{S}{t_2}\right)\right]; \quad (2.7)$$

$$\sigma_u^2 = \sigma^2\left[u\left(\frac{S}{t_1}\right)\right] + \sigma^2\left[u\left(\frac{S}{t_2}\right)\right]. \quad (2.8)$$

Врахувавши вирази для математичного очікування та дисперсії, можна отримати вирази для коефіцієнтів рівняння (2.2):

$$a(U, t) = \frac{M \left[u \left(\frac{S}{t_1} \right) \right] - M \left[u \left(\frac{S}{t_2} \right) \right]}{(t_2 - t_1) \Delta u_0^2}; \quad (2.9)$$

$$b(U, t) = \frac{\sigma^2 \left[u \left(\frac{S}{t_1} \right) \right] + \sigma^2 \left[u \left(\frac{S}{t_2} \right) \right]}{(t_2 - t_1) \Delta u_0^2}, \quad (2.10)$$

де Δu_0 – умовний граничний знос, який вибирається з таким розрахунком, щоб між функціями $u \left(\frac{S}{t_1} \right)$ та $u \left(\frac{S}{t_2} \right)$ був відсутній кореляційний зв'язок.

Випадкову складову $\xi(t)$ у виразах (2.1) та (2.5) можна представити як функцію впливу інтенсивності електричної енергії, що проходить через ковзний контакт, а також навантаження та швидкість:

$$\xi(t) = \varphi(A, P) \cdot \psi(V, P), \quad (2.11)$$

де A – щільність струму; P – тиск; V – швидкість руху електротранспорту.

З достатнім до практики наближенням можна прийняти:

$$\psi(V, p) = V^m P^n, \quad (2.12)$$

$$\varphi(A, P) = (P - P_0)^z \exp(-k(A - A_0)), \quad (2.13)$$

де m , n – емпіричні коефіцієнти, які визначаються з експериментальних досліджень; P_0 – номінальний тиск; A_0 – номінальне значення щільності струму в ковзному контактї.

Підставивши вирази (2.9)-(2.10) в рівняння (2.2), а також враховуючи (2.3)-(2.5) та (2.11)-(2.13) для моделі динаміки процесу зношування ковзних

контактів міського електротранспорту, отримаємо щільність ймовірності величини зносу у наступному вигляді:

$$f_u(t) = \frac{\exp\left[-\frac{1 - I_1 t^2}{2(P - P_0)^{2z} \exp(-k(A - A_0))V^{2m} P^{2n} I_2^2 t^2}\right]}{I_2 t (P - P_0)^{2z} \exp(-k(A - A_0))V^{2m} P^{2n} \sqrt{2\pi t}}, \quad (2.14)$$

де

$$I_1 = \frac{M_u}{\Delta t \Delta u_0}; \quad (2.15)$$

$$I_2 = \frac{1}{\Delta u_0} \frac{\sigma_u}{\sqrt{\Delta t}}, \quad (2.16)$$

де Δt – час пробігу вставок струмоприймача до критичного (граничного) зносу.

Інтегральний закон розподілу зносу, що відповідає диференціальному закону щільності ймовірності (2.14) буде мати вигляд [58]:

$$\begin{aligned} F_u(t) = & \Phi\left(\frac{I_1 t - 1}{I_2 (P - P_0)^z \exp(-k(A - A_0))V^m P^n \sqrt{t}}\right) + \\ & + \exp\left(\frac{2I_1}{I_2^2 (P - P_0)^{2z} \exp(-k(A - A_0))V^{2m} P^{2n}}\right) \times \\ & \times \Phi\left(-\frac{I_1 t + 1}{I_2 (P - P_0)^z \exp(-k(A - A_0))V^m P^n \sqrt{t}}\right), \quad (2.17) \end{aligned}$$

де $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ – інтеграл Лапласа.

Врахувавши закони розподілів зносу (2.14) і (2.17), отримаємо вирази для математичного очікування і дисперсії ресурсу, як функцій інтенсивності процесу зношування поверхні вставок струмоприймачів міського електротранспорту:

$$M_t = \frac{1}{I_1}; \quad \sigma_t^2 = \frac{I_2^2}{I_1^3}. \quad (2.18)$$

Таким чином, закон розподілу ресурсу ковзних контактів міського електротранспорту отримано виходячи з марківської моделі зносу. При цьому, характерним є те, що параметри розподілу мають конкретний фізичний зміст і є характеристиками процесів тертя і зношування, що відбуваються під дією механічної та електричної складових.

2.3 Зміна форми ковзних контактів у процесі експлуатації

Сучасний аналіз процесу зношування [61-65] показує, що система деформування поверхневого шару при терті володіє багаторівневим характером. Матеріалам властиві неоднорідність структури поверхневого шару і концентрація скупчення дефектів та локалізація внутрішніх напружень. В результаті такої концентрації дефектів і росту їх в мікротріщини вздовж границь неоднорідних шарів відбувається руйнування.

Але процес зміни структур елементів системи в межах стану рівноваженості, в залежності від зовнішніх умов (навантаження, температура), будови та властивостей матеріалів може досягти різного ступеню пристосованості [57], зокрема, до різних форм існування дислокаційної структури, її якісних та кількісних характеристик.

Зниження зносу повинно зводитися до анігіляції конфігураційної ентропії [57], тобто до подолання вимог другого закону термодинаміки.

В теоріях неврівноваженого стану та динаміки систем [57, 60] особливу увагу надають нестійкості в цих системах, тобто суттєвому підсиленню початково малих змін, що ймовірно відбудуться з плином часу. Існують системи з двома типами поведінки: такі, що відносяться до неупорядкованого стану при одних умовах та до когерентного – при інших. Порушення впорядкованості відбувається в області термодинамічної рівноваги і поблизу неї [57]. Порядок може утворюватись лише вдалині від врівноваженості при умові підпорядкування системи нелінійним законам визначеного типу. В цьому плані дисипативні структури слід віднести до когерентних явищ, оскільки в них проявляється процес когерентної взаємодії частинок, який характерний для відкритих термодинамічних систем [60]. У відкритих системах відбувається обмін енергією і речовиною із зовнішнім середовищем.

Якщо розглянути взаємодію елементів ковзних контактів міського електротранспорту, то, можна виділити дві системи сил і деформацій: узагальнену і локальну. Узагальнена система характеризує опорну взаємодіючу поверхню ковзного контакту «вставка –провід».

Формування поверхні вставки струмоприймача в процесі попереднього припрацювання і подальшої експлуатації міського електротранспорту можна розглядати в загальному випадку як макрорельєф, а в локальному – як мікрорельєф [60]. Причому макрорельєф буде визначатись сукупністю мікрорельєфів.

У процесі експлуатації геометрична форма вставки струмоприймача змінюється і являє собою складну поверхню n -го порядку, яку при фізичному моделюванні можна спростити і подати у вигляді поверхонь другого порядку, що переходять з одного виду в інший (рис. 2.1).

Процес зносу вставок, що графічно наведено на рис. 2.1, б вказує на те, що матеріал вставки володіє недостатнім рівнем міцності, тобто інтенсивність зносу буде значно перевищувати інтенсивність зносу, яка приведена для

випадку, що представлено на рис. 2.1, а. Тому, в процесі експлуатації міського електротранспорту необхідно забезпечити контактування струмознімної вставки за всією робочою довжиною та шириною.

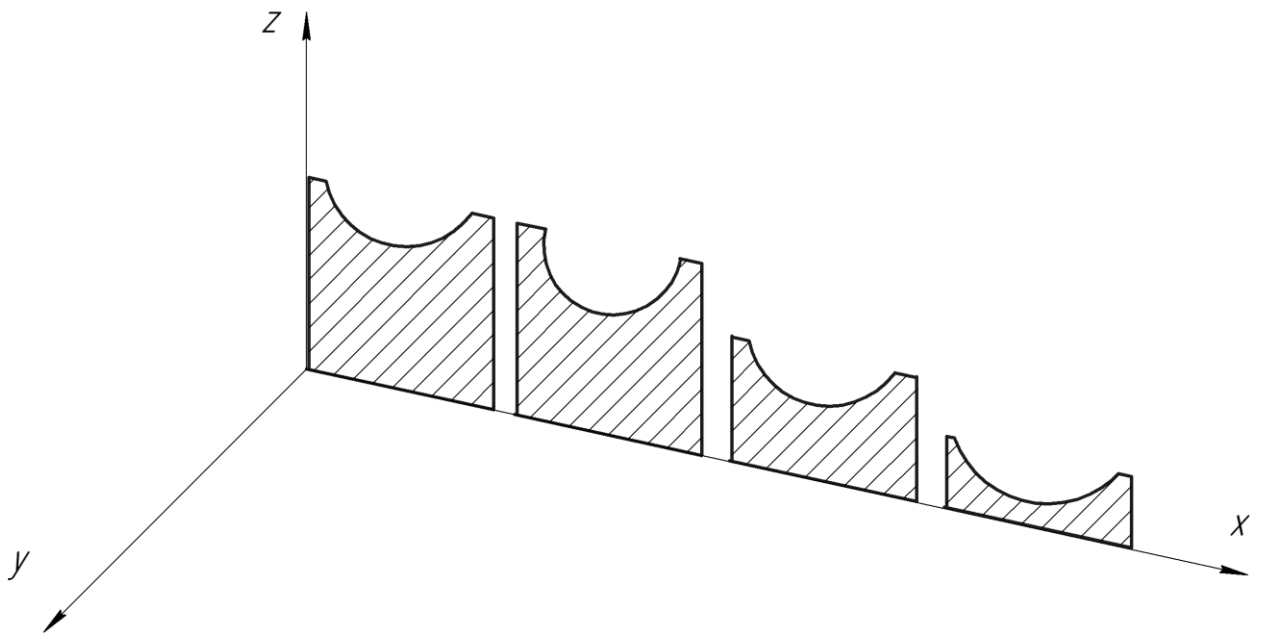
Розглянемо зміну форми перерізу вставок струмоприймача міського електротранспорту з математичної точки зору, врахувавши напружено-деформований стан робочої поверхні [54, 55]. Для цього спрямуємо вісь OY вздовж напрямку руху контактного проводу, а OX і OZ у перпендикулярних напрямках для руху струмоприймача вздовж контактного проводу. Тоді згідно роботи [55] координати точок поверхні вставки струмоприймача можна визначити за виразами:

$$x = f(y, z, c_1) \pm \sqrt{B(y, z, c_1)}; \quad (2.19)$$

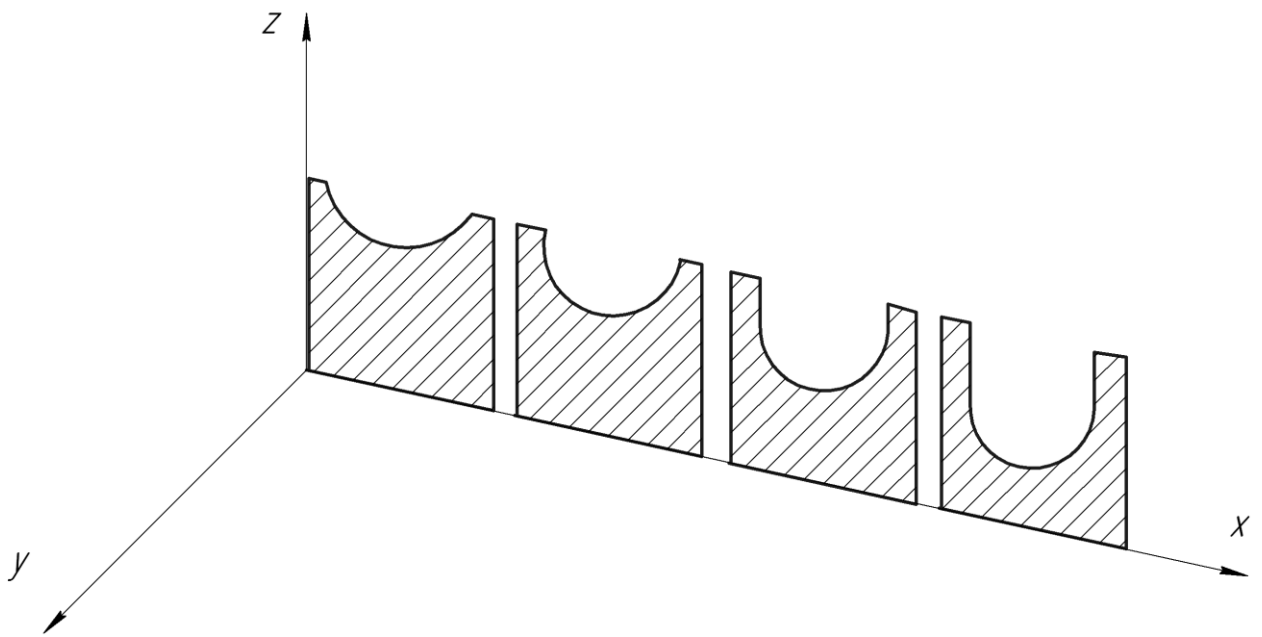
$$y = f(x, z, c_2) \pm \sqrt{B(x, z, c_2)}; \quad (2.20)$$

$$z = f(x, y, c_3) \pm \sqrt{B(x, y, c_3)}; \quad (2.21)$$

де $f(y, z, c_1)$, $f(x, z, c_2)$, $f(x, y, c_3)$ – функції, що характеризують деформації стиску в перерізах XOY , XOZ , YOZ , які виникають у процесі тертя і зношування вставки струмоприймача при взаємодії з контактним проводом; c_1 , c_2 , c_3 – константи, які залежать від форми робочої поверхні вставки струмоприймача; $\pm \sqrt{B(y, z, c_1)}$, $\pm \sqrt{B(x, z, c_2)}$, $\pm \sqrt{B(x, y, c_3)}$ – дівіаторні частини тензора деформацій, що відповідають за видозміну форми вставки струмоприймача при взаємодії з контактним проводом; $B(y, z, c_1)$, $B(x, z, c_2)$,



а



б

Рисунок 2.1 – Зміна геометричної форми поперечного перерізу вставки струмоприймача: від вихідного (нового) до граничного перерізів у процесі експлуатації міського електротранспорту при: а – рівномірному зношуванні за шириною; б – зношуванні за шириною контактного проводу

$B(x,y,c_3)$ – функції переміщення точок робочої поверхні вставки струмоприймача при русі міського електротранспорту у напрямках зазначених осей координат.

Зауважимо, що з рівнянь (2.19)-(2.21) виключено фактор часу і вони характеризують траєкторії руху точок поверхні вставок струмоприймача. Для визначення зміщення будь-якої точки з вихідної поверхні на поверхні, які утворюються в результаті процесу тертя і зношування необхідно провести розклад цих рівнянь в ряд Тейлора [115] і обмежитися похідними першого порядку, оскільки похідні вищого порядку не здійснюють суттєвий вплив на напружено-деформований стан вставок струмоприймача.

У роботі [57] деформацію матеріалу в будь-якій точці вставки струмоприймача можна визначити скороченням будь-якого лінійного елемента поверхні, що проходить через цю точку. Координати елемента по відношенню до досліджуваної точки дорівнюють:

$$dx = \rho l; \quad dy = \rho m; \quad dz = \rho n, \quad (2.22)$$

де ρ – початкова висота елемента; l, m, n – спрямовуючі косинуси, що відображують умови навантаження при протіканні відповідних процесів тертя.

Зміщення u_x, u_y, u_z елемента вздовж осей координат OX, OY, OZ в процесі деформації можна визначити за виразами [56]:

$$u_x = \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\partial A}{\partial z} dz + \frac{\int f(y, z)}{\sqrt{f(y, z, c_1)}} = \frac{\partial A}{\partial y} \rho m + \frac{\partial A}{\partial z} \rho n + \frac{\int f(y, z)}{\sqrt{f(y, z, c_1)}}; \quad (2.23)$$

$$u_y = \frac{\partial A}{\partial x} dx + \frac{\partial A}{\partial z} dz + \frac{\int f(x, z)}{\sqrt{f(x, z, c_2)}} = \frac{\partial A}{\partial x} \rho l + \frac{\partial A}{\partial z} \rho n + \frac{\int f(x, z)}{\sqrt{f(x, z, c_2)}}; \quad (2.24)$$

$$u_z = \frac{\partial A}{\partial x} dx + \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\int f(x, y)}{\sqrt{f(x, y, c_3)}} = \frac{\partial A}{\partial x} \rho l + \frac{\partial A}{\partial y} \rho m + \frac{\int f(x, y)}{\sqrt{f(x, y, c_3)}}. \quad (2.25)$$

В системі рівнянь (2.23)-(2.25) деформації стиску x, y, z визначаються з виразів згідно роботи [142]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + x = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + y = 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + z = 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальні напруження вздовж осей координат; $\tau_{xy}, \tau_{zx}, \tau_{yz}$ – дотичні напруження.

З іншого боку, кількість поглинутої електромеханічної енергії в процесі тертя можна подати у наступному вигляді [86]:

$$A = \mu PL + k I_A U t, \quad (2.27)$$

де μ – механічний коефіцієнт тертя; P – навантаження; L – шлях тертя (пробіг); k – електричний коефіцієнт тертя; I_A – сила струму, що знімається; U – напруга контактної мережі; t – час протікання струму в ковзному контакті.

Кількість енергії в ковзному контакті залежить від інтенсивності енергії, що підводиться і розсіюється. Якщо інтенсивність підведеного потоку електромеханічної енергії подати через похідну від поглинутої енергії за часом t , то отримаємо потужність тертя:

$$\frac{dA}{dt} = \mu PV + k I_A U. \quad (2.28)$$

Враховуючи вираз (2.27), зміщення u_x, u_y, u_z ковзного елемента вздовж осей координат OX, OY, OZ у залежності від пробігу електротранспорту набуде вигляду [86, 139]:

$$u_x = \left(\mu P + \frac{kI_A U}{V} \right) \left(\frac{\partial L}{\partial y} m + \frac{\partial L}{\partial z} n \right) \rho + \frac{\int f(y, z)}{\sqrt{f(y, z, c_1)}}; \quad (2.29)$$

$$u_y = \frac{\int f(x, z)}{\sqrt{f(x, z, c_2)}}; \quad (2.30)$$

$$u_z = \left(\mu P + \frac{kI_A U}{V} \right) \left(\frac{\partial L}{\partial x} l + \frac{\partial L}{\partial y} m \right) \rho + \frac{\int f(x, y)}{\sqrt{f(x, y, c_3)}}. \quad (2.31)$$

Зміщення u_y (вираз (2.30)) буде визначати координати точок при зміщенні u_x , u_z ковзного елемента вздовж осей координат OX та OZ.

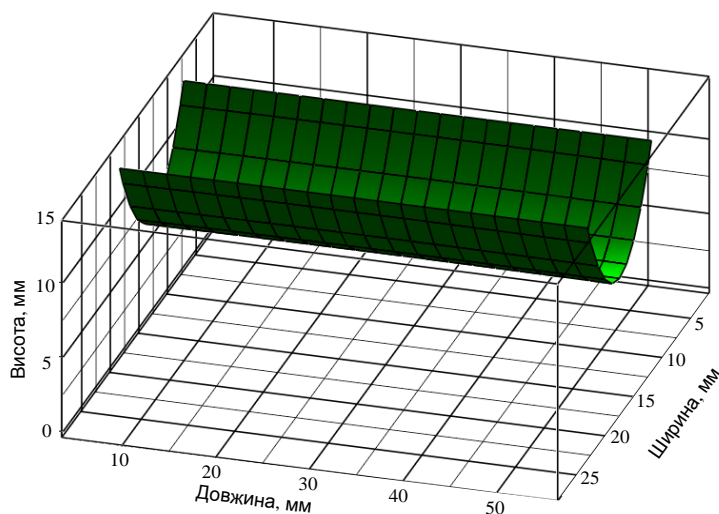
Розв'язуючи систему рівнянь (2.29)-(2.31) для визначених початкових умов та враховуючи геометрію вихідного стану вставки струмоприймача, можна знайти зміщення u_x , u_z , а потім утворений переріз вставки струмоприймача при відповідному пробігу та експлуатаційних навантаженнях міського електротранспорту. Графічна залежність представлена на рис. 2.2 ілюструє вищезазначене.

Розробка моделі, яка описує процес взаємодії контактного проводу із струмознімальною вставкою струмоприймача міського електротранспорту є складною комплексною науково-технічною задачею. Її розв'язання відкриває можливість шляхом комп'ютерного моделювання визначити силові, кінематичні, динамічні та енергетичні параметри, необхідні для проектування вставок та оцінки їх експлуатаційних можливостей.

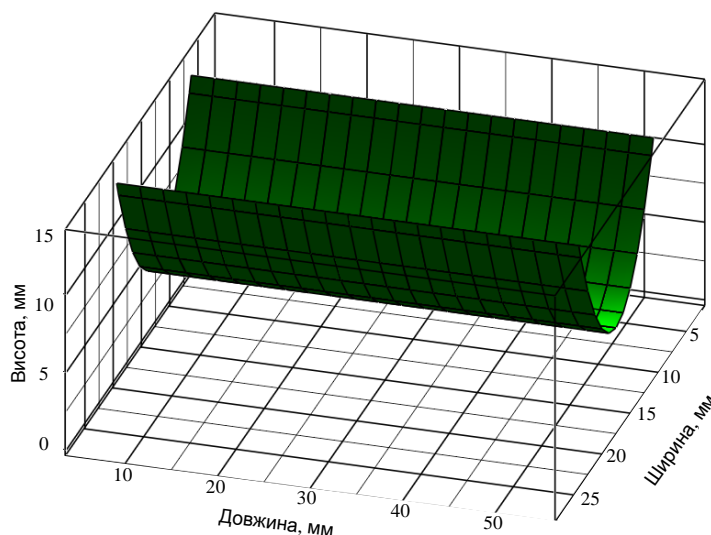
2.4 Аспекти підвищення надійності ковзних контактів міського електротранспорту

Останнім часом спостерігається спад активності дослідників в напрямку розробки нових струмознімальних матеріалів ковзних контактів, що

пояснюється низькою їх довговічністю і не достатніми отриманими техніко-експлуатаційними властивостями. Причини цього наступні.



а



б

Рисунок 2.2 – Утворений переріз вставки струмоприймача при пробігу міського електротранспорту, км: а – 20; б – 60

По-перше, висока вартість нових струмознімальних матеріалів ковзних контактів у порівнянні із застосовуваними вугільно-графітними матеріалами, що призводить до зниження техніко-економічної ефективності їх застосування.

Доцільність застосування нових ковзних контактів на міському електротранспорті визначається із співвідношення витрат на виготовлення і відповідно на збільшення їх ресурсу [61]:

$$\frac{S_{нов} t_{нов}}{S_{заст} t_{заст}} \leq 1, \quad (2.32)$$

де $S_{нов}$, $S_{заст}$ – відповідно вартість нових та раніше застосовуваних матеріалів ковзних контактів; $t_{нов}$, $t_{заст}$ – відповідно ресурс нових та раніше застосовуваних ковзних контактів.

По-друге, спостерігається зниження фізико-механічних властивостей ковзних контактів у процесі експлуатації міського електротранспорту, що призводить до підвищення інтенсивності їх зносу. Особливо це проявляється в зимовий період.

Розглянемо закономірності зношування ковзних контактів міського електротранспорту в залежності від зміни їх властивостей та умов роботи.

Для певного моменту часу процес зношування ковзних контактів шириною db та висотою $d\rho$ можна описати диференціальним рівнянням [86]:

$$\frac{d^2 I}{dbd\rho} = -K \cdot I, \quad (2.33)$$

де I – інтенсивність зносу; K – коефіцієнт пропорційності, що характеризує властивості матеріалів порівнюваних ковзних контактів та їх умови роботи. Коефіцієнт K є змінною величиною, який визначають такі фактори: співвідношення між фізико-механічними, електро- та триботехнічними властивостями порівнюваних ковзних контактів, а також зміна експлуатаційних режимів та умов роботи.

Тобто, коефіцієнт пропорційності буде мати вигляд:

$$K = \frac{H_3 \rho_3 \sigma_3 R_3 f_3}{H_n \rho_n \sigma_n R_n f_n} WT, \quad (2.34)$$

де H_3, H_n – відповідно твердість матеріалу застосовуваних та нових ковзних контактів; ρ_3, ρ_n – питомий електроопір застосовуваних та нових ковзних контактів; σ_3, σ_n – границі міцності на стиск застосовуваних та нових ковзних контактів; R_3, R_n – контактний електроопір застосовуваних та нових ковзних контактів; f_3, f_n – коефіцієнти тертя застосовуваних та нових ковзних контактів; W – вологість навколишнього середовища; T – температура навколишнього середовища.

Тоді закономірність зміни інтенсивності зносу застосовуваних та нових ковзних контактів міського електротранспорту за висотою та шириною матиме вигляд:

$$\Delta I = \sqrt{I_0 \exp\left(-\frac{2H_3 \rho_3 \sigma_3 R_3 f_3}{H_n \rho_n \sigma_n R_n f_n} WTbc\right)}. \quad (2.35)$$

З останнього виразу видно, що зміна інтенсивності зношування за висотою та шириною ковзних контактів відбудеться при підвищенні їх фізико-механічних, електро- та триботехнічних властивостей. Тобто, процесом зносу ковзних контактів міського електротранспорту можна керувати змінюючи технологічні та конструктивні характеристики матеріалу. На практиці це досягається шляхом використання певної технології виготовлення композиційних матеріалів із заданими властивостями, якими можна керувати змінюючи склад матеріалів.

Залежність (2.35) при постійній ширині вставки можна представити наступним чином (рис. 2.3).

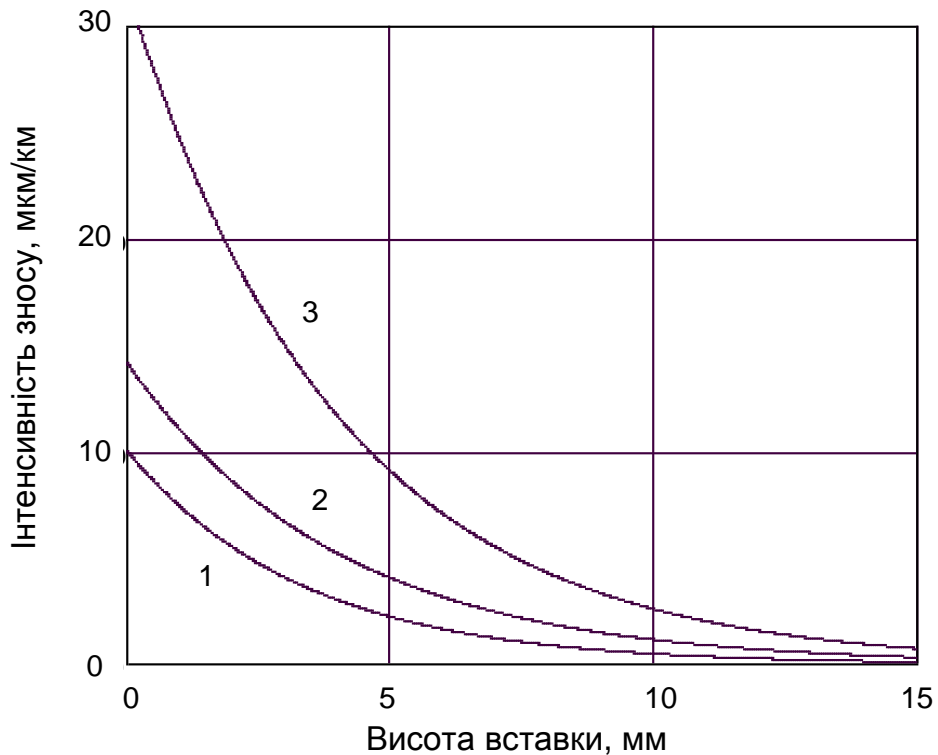


Рисунок 2.3 – Теоретичні залежності зміни інтенсивності зносу за висотою вставки при коефіцієнті пропорційності: 1 – $K=0,2$; 2 – $K=0,3$; 3 – $K=0,5$

Ураховуючи вищенаведене рівняння у виразах (2.29) та (2.31) отримаємо закономірності зміни поперечного перерізу ковзних контактів, а фізико-механічні, електро- та триботехнічні властивості ковзних контактів будуть залежати від концентрації наповнювача і матеріалу матриці, та визначатимуться виразами:

$$u_x = \left(\mu P + \frac{k I_A U}{V} \right) L \sqrt{I_0 \exp(-2 H_n \rho_n \sigma_n R_n f_n W T b c)} \left(\frac{m}{y} + \frac{n}{z} \right) + \frac{\int f(y, z)}{\sqrt{f(y, z, c_1)}}; \quad (2.36)$$

$$u_z = \left(\mu P + \frac{k I_A U}{V} \right) L \sqrt{I_0 \exp(-2 H_n \rho_n \sigma_n R_n f_n W T b c)} \left(\frac{l}{x} + \frac{m}{y} \right) +$$

$$+ \frac{\int f(x, y)}{\sqrt{f(x, y, c_3)}}. \quad (2.37)$$

Границі міцності композиційного матеріалу ковзних контактів на стиск можна визначити за виразом [156]:

$$\sigma = \sigma_m (1 - C_n) + \sigma_n C_n, \quad (2.38)$$

де C_n – концентрація наповнювача; σ_m, σ_n – відповідно границі міцності на стиск матриці та наповнювача композиційного матеріалу.

Твердість композиційного матеріалу ковзних контактів можна оцінити за виразом [156]:

$$H = H_n \frac{H_m + H_n - C_n (H_n - H_m)}{H_m + H_n + C_n (H_n + H_m)}, \quad (2.39)$$

де H_m – твердість матриці; H_n – твердість наповнювача.

За виразами (2.38)-(2.39) легко переконатися в тому, що процесом підвищення або зниження величин границі міцності та твердості можна керувати змінивши концентрацію наповнювача в композиційному матеріалі ковзних контактів.

Наявність на реальних поверхнях тертя ковзних контактів макровідхилень, хвилястості, шорсткості, залишкових напружень і мікротвердості, обумовлених технологією їх виготовлення, призводить до значної зміни класичної кривої зносу. Причому часто допустима величина лінійного зносу робочих поверхонь значно менше товщини поверхневого шару зі змінним станом.

2.5 Критерій можливості підвищення надійності ковзних контактів

Як зазначалось раніше, підвищити надійність та довговічність можна на основі використання композиційних матеріалів.

На основі аналізу літературних джерел [123-127] встановлено, що недоліками всіх відомих струмознімальних елементів є відсутність фізико-хімічної взаємодії складових компонентів матеріалу, яка є наслідком отримання високого питомого електроопору та низької зносостійкості. Особливо таке проявляється під час експлуатації міського електротранспорту.

Встановлено, що найкращим матеріалом для вуглецевмісних ковзних контактів є природний графіт. Для металовмісних ковзних контактів, однозначно, основним компонентом повинна бути мідь. В обох випадках необхідним є забезпечення фізико-хімічної взаємодії всіх складових компонентів, що входять до матеріалу.

Використання у вуглецевмісному та металовмісному матеріалах природного графіту дозволяє підвищити електропровідність і зносостійкість струмознімального елемента. Крім того, природний графіт є найбільш інертним вуглецевим матеріалом по відношенню до окислення при нагріві і володіє найкращими самозмашувальними властивостями.

Тому, в даній роботі пропонується струмознімальний ковзний елемент міського електротранспорту, виконаний з прес-порошку, який включає обміднений вуглецевмісний матеріал та органічне зв'язуюче. При цьому, у склад вуглецевмісного матеріалу входить природний графіт, а у якості зміцнювача і одночасно зв'язуючого використовується піролітичний вуглець, а мідь введена у вигляді шару покриття, нанесеного на частки природного графіту, яка змочує цей графіт, самовільно розтікаючись по ньому.

Для підвищення змочуваності було використано модифікатори природного графіту. Таким елементом став ніобій, але може бути й інший елемент періодичної системи Менделєєва. При цьому, мідь вступає у фізико-хімічну взаємодію з природним графітом і змочує його. В результаті, чого

підвищується електропровідність, а при знятті великих струмів ковзним елементом, під впливом нагріву або під впливом електроерозії, мідь залишається на графіті, не відшаровуючись від нього.

Також у роботі запропоновано інший струмознімальний ковзний елемент виконаний з прес-порошку, який включає обміднений вуглецевмісний матеріал та органічне зв'язуюче. У склад вуглецевмісного матеріалу входить суміш природного та штучного графіту, а мідь введена у вигляді шару покриття, нанесеного на частки природного графіту, яка змочує цей графіт, самовільно розтікаючись по ньому. З метою підвищення міцнісних характеристик струмознімального ковзного елемента, в прес-порошок введено штучний графіт, якому властива більша твердість.

Для визначення розподілу складу композиційного матеріалу матриці та наповнювача, використаємо II закон Ньютона. При цьому, загальне рівняння взаємодії ковзного контакту міського електротранспорту під час експлуатації матиме вигляд:

$$F_{тяги} - F_{тер} = (m^m + m_{зн}^h + m_{зн}^m) \frac{dV}{dt}, \quad (2.40)$$

де m^m – маса струмознімального елемента без урахування зношених частин матриці та наповнювача композиційного матеріалу;

$m_{зн}^h, m_{зн}^m$ – відповідно маси зношених частин матриці та наповнювача композиційного матеріалу струмознімального елемента;

$$m_{зн}^m = \rho^m A^m h^m; \quad (2.41)$$

$$m_{зн}^h = \rho^h A^h h^h, \quad (2.42)$$

де ρ^m, ρ^h – густина відповідно матричної частини та наповнювача композиційного матеріалу;

A^m, A^h – фактична площа зносу відповідно для матриці та для наповнювача;

h^m, h^h – величина зносу відповідно матриці та наповнювача композиційного матеріалу.

Сила тяги згідно [156]:

$$F_{\text{тяги}} = \frac{M}{Vt} = \frac{M}{S}, \quad (2.43)$$

де M – крутний момент, що утворюється при русі, Н·м;

V – швидкість переміщення міського електротранспорту;

t – час переміщення, с;

S – переміщення, м.

Припустимо, що взаємодія струмознімального елемента з контактним проводом відбувається як взаємодія з гранулами у формі куль різної дисперсності, що відрізняється одна від одної в n -раз, а наповнювач композиційного матеріалу має форму циліндрів.

Сила тертя при взаємодії ковзного елемента матиме вигляд [57]:

$$F_{\text{тер}} = \sum_{i=1}^n V_i^k n_i \frac{N}{V_{\text{сер}}^k} (m_{\text{зн}}^m + m_{\text{зн}}^h) \frac{d^2 S}{dt^2} = \sum_{i=1}^n V_i^k n_i \frac{N}{V_{\text{сер}}^k} (\rho^m A^m h^m + \rho^h A^h h^h) \frac{dV}{dt}, \quad (2.44)$$

де V_i^k – об'єм i -ої кулі композиційного матеріалу струмознімального елемента, що взаємодіє з контактним проводом;

n_i – коефіцієнт різниці об'ємів куль;

$V_{\text{сер}}^k$ – середній об'єм куль композиційного матеріалу, що взаємодіють з контактним проводом;

N – кількість гранул композиційного матеріалу, що взаємодіють з контактним проводом.

Тоді, рівняння (2.40) прийме вигляд:

$$\frac{M}{S} - \sum_{i=1}^n V_i^k n_i \frac{N}{V_{cep}^k} (\rho^m A^m h^m + \rho^h A^h h^h) \frac{dV}{dt} = (m^m + \rho^m A^m h^m + \rho^h A^h h^h) \frac{dV}{dt}. \quad (2.45)$$

Можна розрахувати об'єм наповнювачів з урахуванням ймовірності шорсткості робочих поверхонь ковзних контактів за формулою:

$$V^h = \sum_{i=1}^n V_i^h P_i^h = \sum_{i=1}^n P_i^h R_{ni}^2 (H_i^h - R_{cep}^h) \pi, \quad (2.46)$$

де P_i^h – ймовірність того, що шорсткість поверхні наповнювача буде R_{cep}^h ;

R_{ni} – радіус циліндрів твердих включень;

H_i^h – висота циліндрів твердих включень;

R_{cep}^h – середня шорсткість робочих поверхонь твердих включень.

Об'єм матриці можна вирахувати за формулою:

$$V^m = V^{k..m} - V^h, \quad (2.47)$$

де $V^{k..m}$ – об'єм композиційного матеріалу, що відповідає робочій поверхні ковзного контакту.

Спробуємо знайти об'єми робочої поверхні ковзного контакту відповідно матриці V^m та наповнювача V^h виходячи з геометрії контакту.

Розглянемо процес тертя ковзного контакту, який зношується, вигладжується – приймає робочу форму та деформується.

Використовуючи степеневу апроксимацію початкової ділянки опорної кривої композиційного матеріалу ковзного контакту у вигляді [121]:

$$\eta_n = \xi b_n \varepsilon_n^v; \quad (2.48)$$

$$\eta_m = b_m \varepsilon_m^v, \quad (2.49)$$

де b_n, b_m, v – параметри шорсткості, відповідно наповнювача та матриці композиційного матеріалу ковзного контакту;

$\varepsilon_n, \varepsilon_m$ – відносне впровадження часток мідного контактного проводу в робочі поверхні композиційного матеріалу ковзного контакту відповідно наповнювача та матриці;

ξ – коефіцієнт, що враховує вплив пружних деформацій на величину площі фактичного контакту, який розраховується за формулою:

$$\xi = \frac{1 - \mu_m^2}{\pi E_m} + \frac{1 - \mu_{вст}^2}{\pi E_{вст}}, \quad (2.50)$$

де $\mu_m, \mu_{вст}$ – коефіцієнти Пуассона відповідно для контактного проводу та вставки;

$E_m, E_{вст}$ – модулі Юнга для контактного проводу та вставки відповідно.

Виходячи з геометрії контакту, зношений об'єм наповнювача та матриці композиційного матеріалу ковзного контакту буде мати вигляд [121]:

$$V_{зн}^n = \sum_{i=1}^n A_i^n h^n \xi \frac{b_n \varepsilon_n^{v+1}}{v+1}; \quad (2.51)$$

$$V_{зн}^m = \sum_{i=1}^n A_i^m h^m \frac{b_m \varepsilon_m^{v+1}}{v+1}. \quad (2.52)$$

Для множинного контакту з використанням розв'язку контактної задачі Герца [16] можна знайти відносне впровадження часток мідного контактного проводу в матрицю композиційного матеріалу ковзного контакту:

- при пружному контакті:

$$\varepsilon_m = \left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} \frac{q \Theta_m}{\eta_m k_v^m b_m} \sqrt{\frac{R_{cep}}{R_i}} \right)^{\frac{2}{2\nu+1}}; \quad (2.53)$$

- при пластичному контакті:

$$\varepsilon_m = \left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} \frac{q}{HB_m \eta_m b_m} \right)^{\frac{1}{\nu}}, \quad (2.54)$$

де HB – твердість за Бринелем зношеної частини матриці чи HS – твердість за Шором наповнювача композиційного матеріалу ковзного контакту;

q – питоме навантаження на ковзний контакт;

Θ_m – коефіцієнт еластичності Кірхгофа, $\Theta_m = \frac{1-\mu^2}{E}$;

μ – коефіцієнт Пуасона;

E – модуль пружності;

R_i – мікронерівність i -ої поверхні.

Рівняння відносних впроваджень часток мідного контактного проводу в наповнювач композиційного матеріалу ковзного контакту ідентичні з рівняннями (2.51) і (2.52).

Підставивши рівняння (2.53)-(2.54) у (2.51) та (2.52), отримаємо інше - для зношених об'ємів матриці та наповнювача композиційного матеріалу ковзного контакту [84, 88]:

$$V_{зН}^H = \sum_{i=1}^n A_i^H h^H \xi \frac{b_H}{\nu+1} P_i^H(t) \times \sqrt{\left(\left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} \frac{q \Theta_H}{\eta_H k_v^H b_H} \sqrt{\frac{R_{cep}}{R_i}} \right)^{\frac{2}{2\nu+1}} + \left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} \frac{q}{HS_H \eta_H b_H} \right)^{\frac{1}{\nu}} \right)^{\nu+1}}; \quad (2.55)$$

$$V_{3H}^M = \sum_{i=1}^n A_i^M h^M \frac{b_M}{\nu+1} P_i^M(t) \times \sqrt{\left(\left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} \frac{q\Theta_M}{\eta_M k_\nu^M b_M} \sqrt{\frac{R_{cep}}{R_i}} \right)^{\frac{2}{2\nu+1}} + \left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} \frac{q}{HB_M \eta_M b_M} \right)^{\frac{1}{\nu}} \right)^{\nu+1}}, \quad (2.56)$$

де $P_i^H(t)$ – ймовірність знаходження ковзного контакту з елементами наповнювача в стані зносу;

$P_i^M(t)$ – ймовірність знаходження ковзного контакту з елементами матриці в стані зносу.

Оскільки у рівнянні (2.51) $V_{3H}^H = A^H h^H$ та $V_{3H}^M = A^M h^M$, то підставивши значення зношених об'ємів (2.55) та (2.56) у рівняння (2.45) знайдемо величини зносу наповнювача та матриці композиційного матеріалу ковзного контакту:

$$h^H = \frac{\frac{M}{S} - m^m \frac{dV}{dt} - V^{\kappa.M.} \rho^M \frac{dV}{dt} \left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} + 1 \right)}{(\rho^H - \rho^M) \frac{dV}{dt} \left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} + 1 \right) \sum_{i=1}^n A_i^H \xi b_H P_i^H(t)} \times \sqrt{\left(\left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} \frac{q\Theta_H}{\eta_H k_\nu^H b_H} \sqrt{\frac{R_{cep}}{R_i}} \right)^{\frac{2}{2\nu+1}} + \left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} \frac{q}{HS_H \eta_H b_H} \right)^{\frac{1}{\nu}} \right)^{\nu+1}}; \quad (2.57)$$

$$h^M = \frac{\frac{M}{S} - m^m \frac{dV}{dt} - V^{\kappa.M.} \rho^H \frac{dV}{dt} \left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} + 1 \right)}{(\rho^M - \rho^H) \frac{dV}{dt} \left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} + 1 \right) \sum_{i=1}^n A_i^M b_M P_i^M(t)} \times \sqrt{\left(\left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} \frac{q\Theta_H}{\eta_M k_\nu^M b_M} \sqrt{\frac{R_{cep}}{R_i}} \right)^{\frac{2}{2\nu+1}} + \left(\sum_{i=1}^n V_i^\kappa n_i \frac{N}{V_{cep}^\kappa} \frac{q}{HB_M \eta_M b_M} \right)^{\frac{1}{\nu}} \right)^{\nu+1}}. \quad (2.58)$$

Оскільки величини зносу наповнювача та матриці композиційного матеріалу ковзного контакту повинні бути рівними для забезпечення високої надійності, довговічності та працездатності міського електротранспорту, то порівнявши рівняння (2.55) і (2.56) можна знайти відношення, яке відобразить склад композиційного матеріалу ковзного контакту. Графічно, для матеріалу матриці – мідь та наповнювача – природного графіту або природного графіту разом зі штучним графітом чи піролітичним вуглецем зобразити залежність відносного зносу струмознімального елемента від вагового відношення вмісту матриці та наповнювача можна наступним чином (рис. 2.4). Причому $\frac{m_m}{m_n} = \frac{m_m}{100 - m_m}$, де m_m, m_n – маса відповідно для матриці та наповнювача.

Виходячи з вищевказаної залежності можна запропонувати наступні склади матеріалів для ковзних контактів. Співвідношення компонентів у першому прес-порошку з вищезазначеними матеріалами складає, ваг. %:

природний графіт	70,0 – 93,0
мідь	4,0 – 28,0
піролітичний вуглець	решта,
а другого, ваг. %:	
природний графіт	55,0 – 70,0
штучний графіт	15,0 – 30,0
мідь	10,0 – 13,0
зв'язуюче	решта.

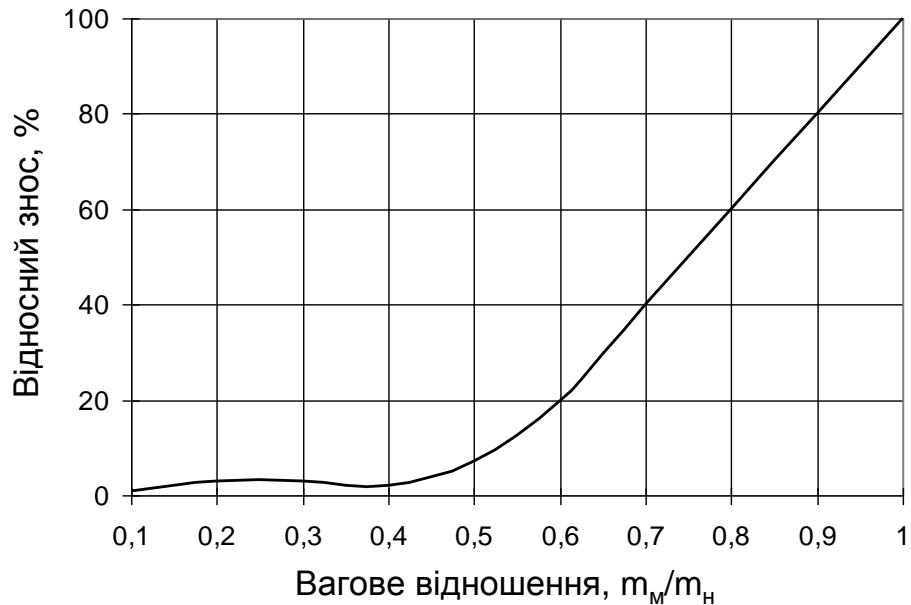


Рисунок 2.4 – Залежність відносного зносу струмознімального елемента від вагового відношення вмісту матриці та наповнювача

При цьому, ніобій входить у ваговий склад природного графіту як модифікатор і складає 5...8 % від його кількості.

Перший струмознімальний ковзний елемент виготовляли наступним чином. Прес-порошок готували змішуванням компонентів: порошку піролітичного графіту дисперсністю 10...50 мкм, порошку міді дисперсністю 50...100 мкм, порошку природного графіту дисперсністю 20...40 мкм з модифікатором, по якому самовільно розтікається шар міді і порошки зв'язуючого, в даному випадку піролітичного графіту. Всі вищезгадані компоненти перемішували. Прес-порошок отриманої суміші пресували при температурі не вище 200°C на протязі 10...50 с при тиску 150...200 МПа, а потім спікали, тобто проводили термообробку отриманих заготовок у захисному середовищі при температурі 600...700°C і швидкості нагрівання 500...600°C/год.

Виготовлення другого струмознімального ковзного елемента відбувалося так. Прес-порошок готували змішуванням компонентів: порошку штучного графіту дисперсністю 50...150 мкм, порошку міді дисперсністю 50...100 мкм,

порошку природного графіту дисперсністю 100...200 мкм з модифікатором, по якому самовільно розтікається шар міді і порошки зв'язуючого. Всі вищезгадані компоненти перемішували. Прес-порошок отриманої суміші пресували при температурі не вище 170°C протягом 10...60 с при тиску 220...350 МПа, а потім проводили термообробку отриманих заготовок у захисному середовищі при температурі 500...600°C і швидкості нагрівання 500...1500°C/год.

2.6 Висновки

Проведені теоретичні дослідження щодо підвищення надійності ковзного контакту міського електротранспорту дали змогу зробити такі висновки:

1. На основі марківської моделі зносу отримано закон розподілу ресурсу ковзних контактів міського електротранспорту (вирази (2.14), (2.17)). При цьому, характерним є те, що параметри розподілу мають конкретний фізичний зміст і є характеристиками процесів тертя і зношування, що відбуваються під дією механічної та електричної складових.

2. З математичної точки зору, врахувавши напружено-деформований стан робочої поверхні ковзного контакту отримана математична модель динаміки його зношування (система рівнянь (2.29)-(2.31)) для визначених початкових умов, розв'язуючи яку та враховуючи геометрію вихідного стану ковзного контакту можна знайти зміщення, тобто знос, а потім визначити утворений переріз при відповідному пробігу та експлуатаційних навантаженнях міського електротранспорту. Крім того, розв'язання цієї системи рівнянь відкриває можливість шляхом комп'ютерного моделювання визначити силові, кінематичні, динамічні та енергетичні параметри, необхідні для проектування ковзних контактів та оцінки їх експлуатаційних можливостей.

3. Обґрунтовано можливість підвищення надійності ковзних контактів міського електротранспорту шляхом застосування нових композиційних матеріалів.

Для порівняння тих, що застосовувались та нових ковзних контактів міського електротранспорту запропонована закономірність зміни інтенсивності їх зносу за висотою та шириною, яка показує, що зменшення інтенсивності зносу за висотою та шириною ковзних контактів відбудеться при підвищенні їх фізико-механічних, електро- та триботехнічних властивостей (рис. 2.3). Тобто, процесом зносу ковзних контактів міського електротранспорту можна керувати змінюючи технологічні та конструктивні характеристики матеріалу. На практиці це досягається шляхом використання певної технології виготовлення композиційних матеріалів із заданими властивостями, спрямовувати які можна шляхом зміни складу матеріалів.

4. Фізико-механічні, електро- та триботехнічні властивості ковзних контактів залежать від концентрації наповнювача і матеріалу матриці, а закономірність зміни їх поперечного перерізу визначатимуться виразами, запропонованими в роботі (вирази (2.55)-(2.58)).

На основі зазначених виразів побудовано графічну залежність (рис. 2.4) відносного зносу струмознімального елемента від вагового відношення вмісту матриці та наповнювача, відповідно до якої запропоновано склади струмознімальних ковзних елементів міського електротранспорту, які забезпечують фізико-хімічну взаємодію композиційних матеріалів – матриці та наповнювача. Крім того, запропоновано вирази для визначення величин зносу матриці та наповнювача, прирівнюючи які можна знайти відношення вмісту складових композиційного матеріалу ковзного контакту із забезпеченням високої надійності, довговічності та працездатності міського електротранспорту.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ТА ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Методика досліджень структури ковзних контактів

Дослідження мікроструктури мідного контактного проводу та струмознімальної вставки проводили на мікрошліфах. При виготовленні зразків намагалися уникнути процесів нагрівання та наклепування.

Спочатку вирізали з контактного проводу кільця висотою 11..13 мм та зі вставок робили поперечний зріз висотою 13..15 мм на універсальному заточному верстаті дисковими кругами з достатнім охолодженням. Приготування мікрошліфу здійснювали відповідно до [98]. Зразок, розміщений у металевій оправці заливали протокрілом. Процес підготовки мікрошліфів складався з декількох етапів: підготовка плоскої поверхні; шліфування, полірування [129].

Підготовку шліфу контактного проводу здійснювали методом електрополірування [77, 129], який дає можливість недопущення викривлень, що виникають в структурі поверхні шліфа при його механічному підготуванні. Травлення виконували у тому ж розчині, що і електрополірування. Електролітом слугувала ортофосфорна кислота з питомою вагою 1,54.

Для приготування шліфу та виявлення структури перед електрополіруванням і електротравленням відпрацьовувався їх режим. Витримка шліфу визначалась проміжком часу, за який убирався наклепаний шар міді, що утворюється в результаті приготування шліфу. Було встановлено, що при напрузі 1,4...1,8 В електрополіруванням впродовж 15...25 хвилин знімається повністю шар наклепаного металу товщиною 0,02...0,04 мм, який утворюється в процесі вирізання шліфу. Електротравлення виконували при

температурі електроліту 25...30 °С, напрузі 0,5 В і часом витримки 3...4 хв. [129].

Для мікроструктурних досліджень використовували мікроскоп МИМ-8М та "Neophot-23". Виявлену структуру розглядали при збільшеннях $\times 100 \dots 900$ та фотографували.

Металографічна морфологія поверхонь тертя вивчалась на РЕМ "Сameбах mikrobeam".

За допомогою рентгеноструктурного та фазового аналізів визначали структуру, фазовий склад та фізичні характеристики робочих шарів контактного проводу та вставок. Дослідження проводили на дифрактометрі ДРОН-3М у K_{α} -Со випромінюванні при напрузі на трубці 30 кВ і струмі 40 мА.

Більш глибоке вивчення структури мідного шару проводили методом "ковзного" пучка рентгенівських променів, розробленим Л.М. Рибаквою та Л.І. Куксеновою [133].

Метод дозволив визначити ширину інтерференційної лінії β на дифрактограмі, що містить інформацію про розміри блоків мозаїки (одиниці структури, які когерентно розсіюють рентгенівські промені), і мікродеформації ε кристалічної решітки міді. Зазначимо, що величина β характеризує один із основних процесів в поверхневому шарі міді, пов'язаних з розвитком дислокаційної структури в ході пластичної деформації при терті і зношуванні.

Для того, щоб одержати інформацію від різних шарів металу й проводити пошарове дослідження із заданим кроком використано спеціальний калімаційний пристрій, що забезпечує формування вузького й практично паралельного пучка рентгенівських променів, що падають на досліджувану поверхню зразка.

Швидкість переміщення стрічки складала 1800 мм/год. Швидкість обертання лічильника при зніманні з поверхні зразка не перевищувала 2 град/хв. Знімання проводили протягом 1,5 год.

Графічне розділення лінії на компоненти α_1 та α_2 проводили за методом Речінгера [133]. Розмір блоків мозаїки і величина мікростворень решітки

розраховували методом моментів другого порядку. Загальний момент другого порядку може бути подано у вигляді суми двох членів, перший з яких залежить від ефективного розміру блоку когерентного розсіяння D , а другий – від середнього квадрату мікроступорень ε^2 : мм²

$$W(2\Theta) = \frac{k\lambda\Lambda 2\Theta}{2\pi^2 D \cos\Theta_0} + 4\varepsilon^2 \operatorname{tg}^2\Theta_0, \quad (3.1)$$

де λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання, яке використовується; 2Θ – кутовий інтервал, для якого обчислюють момент другого порядку; Θ_0 – бреггівський кут, що залежить від форми блоків та індексів кристалографічної площини.

Розмір D блоку оцінювали за виразом:

$$D = \frac{k\lambda}{2\pi^3 A \cos\Theta_0}, \quad (3.2)$$

де $A = \operatorname{tg}\alpha$.

Перетин продовження лінійної ділянки з віссю ординат при $X=0$ визначає $B = 4\varepsilon^2 \operatorname{tg}^2\Theta_0$. Звідки визначається середня величина мікротреформації кристалічної ґратки:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \sqrt{B} \cdot \operatorname{ctg}\Theta_0, \quad (3.3)$$

а щільність дислокацій – за виразом Вільямсона-Споломена [158]:

$$\rho = \frac{3n}{D^2}, \quad (3.4)$$

де ρ – щільність дислокацій, м^{-2} . Для випадкових хаотично розподілених дислокацій $n=1$.

Для виявлення дифузійних процесів враховували зміну параметру ґратки матеріалу в процесі тертя взаємодіючих елементів, тобто за дифрактограмами в перехідній зоні визначали параметр ґратки.

Рентгеноструктурні дослідження контролювали методом оже-електронної спектроскопії [158]. Для вивчення розподілу хімічних елементів у поверхневих шарах взаємодіючих матеріалів, була використана сильна залежність інтенсивності піків оже-електронів від кута падіння первинних електронів, а також порівняльний аналіз інтенсивності різних піків одного й того ж елементу. Оже-електронні спектри знімали на електронному високовакуумному електрометрі ES-300 фірми “Kratos” з розподільчою здатністю приладу – 0,95 еВ для лінії Ag 3d_{5/2}.

Дослідженню підлягали доріжки тертя, а також поверхня мідного зразку за глибиною, при травленні його в середовищі аргону.

Зразки запропонованих дослідних композицій (рис. 3.1) досліджували на міцність, твердість та електропровідність.

При цьому, діаметри досліджуваних композиційних зразків складали $d = 10,7 \dots 13,0$ мм.

3.2 Будова і принцип дії установки для випробування зносостійкості лабораторних зразків

Випробування проводяться на установці ЗНМ-17, представленої на рис. 3.2, в якій електродвигун через клинопасову передачу передає крутний момент на вал, на котрому закріплено контртіло яке виготовлене з міді. Дослідний зразок має циліндричну форму і жорстко закріплений в струпцинах. Кількість

обертів та кілометраж фіксує спідометр. Дослідний зразок притискається до контртіла за допомогою противаги з закріпленою на кінці гирею.



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд дослідних зразків



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд установки ЗНМ-17

Пристосування складається з таких основних частин: гвинта, гайки, двох захватів, траверси, набору змінних наконечників. Захвати на пристосуванні кріпляться за допомогою пальців. За допомогою притискного механізму, що складається зі спіральних пружин, які встановлені в прорізи захватів та верхніх і нижніх пазів, захвати можливо переміщувати по довжині траверси в залежності від розмірів випресувальної деталі. Траверса складається із двох планок, між якими встановлено гайку і стиснена двома болтами. Притискний механізм сприяє утриманню захватів в прорізах траверси.

У залежності від діаметра деталі, що знімається захвати переміщуються на траверсі по виконаним прорізам. Шляхом обертання гвинта підводять захвати до посадки торцевої поверхні деталі, що знімається. Обертають гвинт до упору наконечника в центровий отвір вала. Прикладаючи зусилля при обертанні гвинта відбувається зняття деталі.

Дослідження проводили на зразках контактного проводу МФ-100 та ковзних контактах. У кожній серії проводили випробування на 4...7 зразках.

3.3 Будова і принцип дії установки для випробування зносостійкості струмознімальних вставок

Для досліджень зносостійкості серійних та запропонованих вставок було застосовано установку БК-1, загальний вигляд якої наведено на рис. 3.3.

Робота пристосування відбувається таким чином: вал встановлюється на призми. Далі необхідно загвинтити шток, який через штифт з'єднується з важелем. При переміщенні штоку верхня половина важеля подається вперед і повертається навколо своєї осі, яка сполучена зі шпонкою. Права половина важеля тисне на тягу, на якій закріплена притискна пластина, що переміщується вниз і затикає встановлений в призму вал.



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд установки БК-1

На пристосуванні можна закріпити два вали, що прискорить виконання операцій фрезування шпонкових пазів. Для вивільнення валів після фрезування шток необхідно відгвинтити і через скобу і тягу планка піднімається вгору.

Дослідження проводили на зразках контактного проводу МФ-100 та ковзних контактах. У кожній серії проводились випробування на 4...7 зразках.

3.4 Методика досліджень фізичних властивостей ковзних контактів

Для оцінки мікротвердості окремих фаз або структурних складових після процесу тертя та зношування взаємодіючих матеріалів у роботі проводили дюрOMETричні дослідження.

Поверхню зразка для визначення мікротвердості готували так само, як і

для дослідження мікроструктури.

Вимірювання проводили на приладі мікротвердомірі ПМТ-3 при збільшенні $\times 487$ у відповідності з ГОСТ 9450-76 – «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников».

Мікротвердість вимірювали при навантаженні 10 г на інденторі і часом витримки під навантаженням 15 с. В кожній зоні робили по 15 – 20 відбитків.

Визначали розподіл мікротвердості за глибиною мідного робочого шару. Вимірювання проводили на повздовжніх і поперечних шліфах, вирізаних з ділянок, які піддавалися процесам тертя та зношування. Також визначали зміну мікротвердості в шарах металу, що прилягає до робочої поверхні тертя та порівнювали з мікротвердістю поверхні ближчою до центру зразка. В кожній зоні виконувалось по 100 – 200 вимірювань зерен, причому вимірювання зерен проводилося по лініям, паралельним границі тертя, на відстані 0,1 і 2 мм від неї.

Обробку результатів вимірювання проводили методами математичної статистики запропонованими у роботі [88] з використанням пакетів прикладних програм на ЕОМ. Похибка у визначенні мікротвердості не перевищувала 7 %.

Твердість отриманих вставок вимірювали склероскопічним методом за Шором [102].

В процесі досліджень було виявлено вплив процесів тертя та зношування на мікротвердість робочих поверхневих шарів контактного проводу та на твердість робочих поверхонь запропонованих вставок. Після випробувань ковзних контактів досліджено зміну мікротвердості робочих поверхневих шарів контактного проводу та твердості запропонованих вставок. Випробовування ковзних контактів проводили при різних варіаціях сполучених елементів.

Випробування зразків контактного проводу на розтяг, а запропонованих вставок на стиск проводили на машині УИМ-50М. Довжина зразків контактного проводу, згідно [135] складала 113 мм. За допомогою діаграмного апарату було отримано діаграми розтягу та стиску. Максимальну силу, що відповідає границі міцності, реєстрували за показаннями динамометра машини УИМ-50М.

Границю міцності розраховували, згідно [135] за формулою:

$$\sigma_m = \frac{P_{\text{макс}}}{F_0}, \quad (3.5)$$

де F_0 – початкова площа поперечного перерізу, м².

Відносне подовження та скорочення розраховували за формулою:

$$\delta = \frac{\Delta l_0}{l_0} \cdot 100\%, \quad (3.6)$$

де Δl_0 – приріст або зменшення розрахункової довжини зразка, м; l_0 – початкова довжина чи висота, м.

Дослідження проводили на зразках контактного проводу МФ-100 після процесів тертя та зношування ковзних контактів. У кожній серії проводили випробування на 4...7 зразках.

Температуру рекристалізації визначали посереднім методом [156], який ґрунтується на зміні структурно-чутливих властивостей при нагріванні, сильніше всього реагуючих на щільність і характер розподілення дислокацій – твердості, границі текучості, тимчасового опору, внутрішнього опору.

Дослідження по визначенню зміни механічних властивостей міді в залежності від температури нагрівання проводили з наступними режимами: витримка – 1 год, температура нагрівання відповідно 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500 та 600 °С.

Дослідження проводили на зразках контактного проводу МФ-100 після взаємодії із запропонованими вставками. Випробуванню підлягали 3...8 зразків.

3.5 Методика досліджень електротехнічних властивостей ковзних контактів

Електричний опір дослідних та серійних зразків вимірювали компенсаційним методом за допомогою нановольтметра Р-341 при похибці приладу не більше 0,1 %.

Питомий опір розраховувався за формулою:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad (3.7)$$

де R – опір визначений омметром, Ом;

S – площа поперечного перерізу зразка, мм²;

l – довжина зразка, мм.

Дослідження проводили на зразках ковзних контактів. У кожній серії проводили випробування на 4...7 зразках.

3.6 Методика дослідження триботехнічних властивостей ковзних контактів

3.6.1 Величина зносу

Вимірювання зносу вставок здійснювалося ваговим методом на аналітичних вагах ВЛА-200М з точністю до 0,1 мг через певні проміжки часу. Під час дослідів, коли застосовувалась вода, перед зважуванням вставки витримували 3-4 години в термостаті при температурі 105°C.

Знос проводу вимірювався безпосередньо на машині приладом УПОИ-6 (рис. 3.4), виконаним на основі методу штучних баз [154]. Базами були лунки, що наносились алмазною пірамідкою у напрямку, який співпадає з радіусом диску. Всього на проводі нарізано 13 таких лунок. Поточний розмір лунки, за яким визначається знос проводу, вимірювався за допомогою мікроскопа, який є частиною приладу.



Рисунок 3.4 – Прилад УПОИ – 6 для вимірювання зносу методом штучних баз

Для елементів трибосполучення проводили дослідження залежності величини та інтенсивності зносу від сили струму, контактної тиску та швидкості обертання диску. Дослідженню підлягали зразки контактної проводу марки МФ-100 та вставки стандартні та запропоновані.

Досліджували залежність питомого зносу контактної проводу та вставок від сили струму. Крім цього, проведено дві серії дослідів із зазначеними зразками: без подачі та з подачею води у зону контакту.

Дослідження проводили на ковзних контактах, у кожній серії випробувань було 4...7 зразків.

3.6.2 Контактний опір

В нерухомому і ковзному контакті дотик обох елементів досліджуваної системи здійснюється по окремим точкам (плямам контакту). Ці плями складають певну частку поверхні тертя, в яких має місце металевий чи квазіметалевий контакт. Розміри плям збільшуються з підвищенням

контактного тиску і зменшуються зі збільшенням шорсткості та твердості контактних матеріалів [140].

Через зміщення ліній струму до області плям і наявності окисних плівок на сполучених поверхнях контактний електричний опір $R_{\text{конт}}$ завжди більше опору основної ділянки з тими ж розмірами

$$R_{\text{конт}} = R_{\text{зм}} + R_{\text{плівк}}, \quad (3.8)$$

де $R_{\text{зм}}$ – опір зміщення, який визначається матеріалом контактних елементів, мікрогеометрією контактних поверхонь та натисненням;

$R_{\text{плівк}}$ – опір поверхневих плівок.

Для визначення величини $R_{\text{конт}}$ використовували метод амперметра – вольтметра, схема якого подана на рис. 3.5. При цьому, опором контактного проводу нехтували, а електроопір вставок віднімався від загального опору, а потім визначався контактний електроопір $R_{\text{конт}}$.

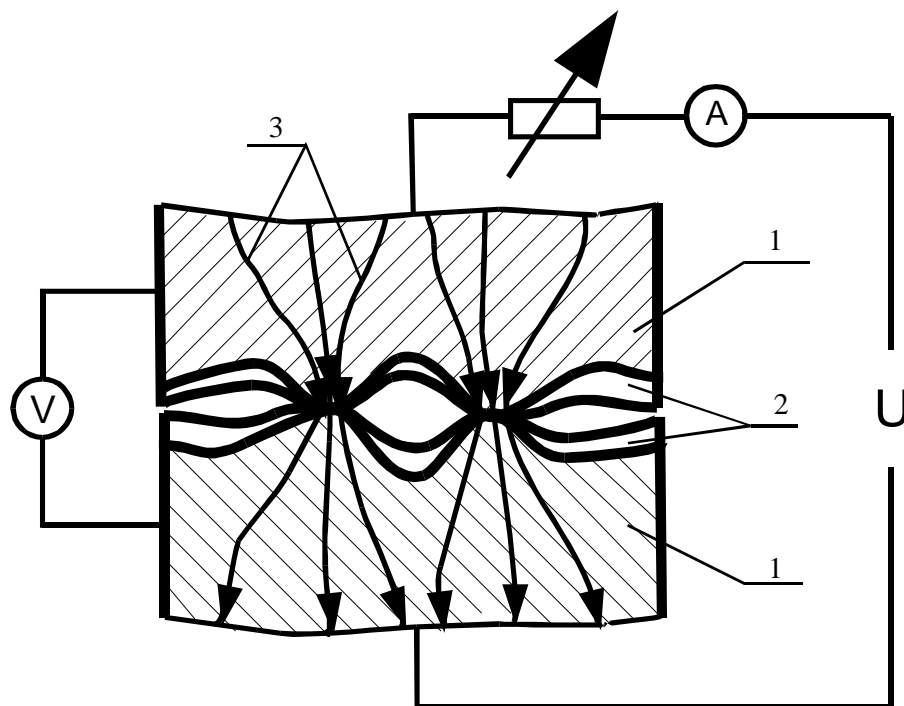


Рисунок 3.5 – Схема вимірювання контактної опору: 1- контактні елементи; 2- поверхневі плівки; 3- умовні лінії струму

Співвідношення $R_{\text{стяг}}$ і $R_{\text{плів}}$ може бути різним навіть для однієї і тієї ж контактної пари, особливо в контакті, що ковзає, де під впливом зовнішніх факторів може змінюватися мікрогеометрія поверхонь тертя, змінюватися чи зникати поверхнева плівка.

Дослідження проводили на зразках при випробуваннях на установках ЗНМ-17 та БК-1.

Під час вимірювань встановлювали залежність контактного опору від сили тиску та сили струму на зразках стандартних та запропонованих.

Всі досліди проведені при катодно- поляризованих вставках. При нерухомому контакті потенційні кінці розміщувалися на проводі і одній із вставок. При рухомому контакті потенційний кінець розміщувався на контактному кільці диску.

У випадку рухомого контакту з величини виміряного спаду напруги віднімали величину, отриману в статичних умовах при незмінній величині сили струму на ділянці контактне кільце – контактний провід.

З метою недопущення надмірного нагрівання контакту тривалість кожного вимірювання не перевищувала декількох секунд.

3.6.3 Шорсткість поверхні

Для вимірювання шорсткості робочої поверхні мідного контактного проводу, згідно ГОСТ 2786-73 використовували профілографи-профілометри "Тамсэрф-5" англійської фірми "Тэйлор Хобсон" та заводу "Калібр" (м. Москва) модель 21.

Перший дозволяє проводити дослідження з високою локальністю $0,2 \dots 2,0 \cdot 10^{-6}$ м, чутливістю $0,01 \dots 0,50\%$ і точністю $1 \dots 4\%$.

В роботі досліджено динаміку зміни шорсткості контактного проводу при взаємодії зі стандартними та запропонованими вставками при фіксованих і

змінних параметрах електромеханічного процесу зношування системи "контактний провід – вставка струмоприймача" на установках ЗНМ-17 та БК-1.

3.6.4 Коефіцієнт тертя

Коефіцієнт тертя визначали експериментально та оцінювали теоретично за методикою, яка запропонована в роботі [54].

Експериментально коефіцієнт тертя f_{mp} , визначали за моментом тертя M_{mp} в процесі дослідження на установках ЗНМ-17 та БК-1., який фіксували на діаграмній стрічці. Знаючи момент тертя і змінюючи навантаження на зразки, коефіцієнт тертя оцінювали за виразом:

$$f_{mp} = \frac{M_{mp}}{p \cdot R \cdot S}, \quad (3.9)$$

де p – сила навантаження; R – радіус кривизни поверхні тертя;

S – площа контактної поверхні трибосполучення.

При оцінці коефіцієнту тертя вважали, що взаємодія контактного проводу і вставки відбувається в умовах пластичного деформування при багатоточковому контакті [106].

В процесі експериментальних досліджень встановлювали залежність коефіцієнту тертя системи "контактний провід – вставка" від кількості обертів диску, з подачею чи без подачі води в зону контакту на установках ЗНМ-17 та БК-1 при силі струму 100 А.

3.6.5 Температура в зоні контакту

Температуру в зоні контакту визначали за допомогою термопари "ХА" і потенціометра ПСМГ-0,1. Градування термопари здійснювали за допомогою

проторованої трубчатій печі типу Т-40/600 з автоматичним регулятором температури. В якості реєструючого приладу використовували шлейфовий осцилограф. За допомогою градуйованої термопари визначали різницю температур гарячого і холодного спаїв. Дійсну температуру визначали як суму $T = \Delta T + T_x$, де ΔT – різниця температур гарячого і холодного спаїв, T_x – температура холодного спаю. Градування проводили з інтервалом 10К.

При визначенні температури нагрівання поверхні тертя термопару зачеканювали в зразок (вугільну вставку), схема якої наведена на рис. 3.6. Термопару включали на шлейфовий осцилограф з гальванометром МО17-150.

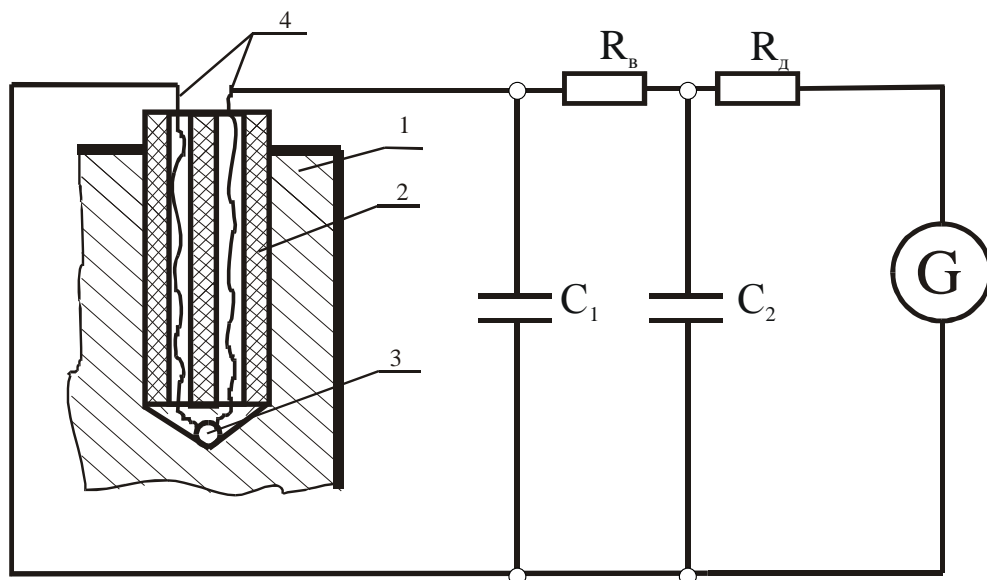


Рисунок 3.6 – Схема включення термопари для градування і запису термічних кривих: 1 – вугільна вставка; 2 – керамічна трубка; 3 – гарячий спай хромель-алюмелевої термопари; 4 – ізольовані дроти термопари; R_B – власний опір ланцюга; R_d – додатковий опір в мережі; C_1, C_2 – конденсатори; G – шлейфовий осцилограф з гальванометром

Схема підключення шлейфового осцилографу для вимірювання температури показана в роботі [28]. Нульова лінія осцилографа відповідала кімнатній температурі. Запис термічної кривої проводили при швидкості стрічки 0,01...0,25 м/с. Осцилограф вмикали на запис за 10 секунд до зупинки спеціальної лабораторної машини. Після вимикання машини запис на

осцилографі припинявся, після того як світлова точка на його шкалі виходила за верхню межу, що відповідає довжині променя 115 мм. За одержаною кривою фіксували залежність температури від тривалості контактної взаємодії елементів системи. В наступних випадках температуру в зоні контакту контролювали за допомогою реле часу.

Дослідження проводили в процесі випробувань на установках ЗНМ-17 та БК-1 при всіх можливих взаємодіях елементів системи "провід – вставка" та визначали залежність температури в зоні контакту від сили струму та кількості обертів диску з подачею та без подачі води у контакт.

3.7 Методика дослідження ресурсу зразків ковзних контактів

Загальна послідовність випробовувань і порядок визначення параметрів k_w , m за результатами випробовувань складається з наступних етапів [99].

Проводяться випробовування на знос зразків з площадками контактів, що змінюються і періодично (або безупинно) вимірюються розміри a і b площадок контактів. Складаються таблиці і графіки залежності розмірів площадки контакту від шляху тертя S :

$$a=a(S). \quad (3.10)$$

Експериментальна залежність представляється у вигляді степеневій функції. Визначаються параметри C і β цих апроксимацій.

Дослідження вуглецевих матеріалів спочатку проводимо за схемою паралельних циліндрів при наступних умовах:

Шлях тертя:

$$S=2\pi R \cdot 65 \cdot n, \quad (3.11)$$

де $R=35$ мм.

$$S=2 \cdot 3,14 \cdot 35 \cdot 65 \cdot n = 14,3 \cdot n;$$

Діаметр циліндра контртіла $d = 70$ мм;

Матеріал контр тіла – мідь;

Діаметри досліджуваних зразків $d_1 = 10,7$ мм, $d_2 = 13,0$ мм;

Сила притискання $Q = 4$ кг.

Експериментальна залежність представляється у вигляді степеневі функції. Визначаються параметри C і β цих апроксимацій за формулами:

$$\beta = \frac{\lg a_1 / a_2}{\lg S_1 / S_2}, \quad (3.12)$$

$$C = \frac{a_1}{S_1^\beta}. \quad (3.13)$$

За формулами визначаються параметри m і k_w моделі зношування:

$$m = \frac{1 - 2\beta}{\beta}, \quad (3.14)$$

$$k_w = \frac{C^{2m+2}}{(m+2)(2b)R} \quad (3.15)$$

Знос контакту розраховуємо за формулою:

$$U_w = K_w \cdot \sigma^m \cdot S, \quad (3.16)$$

де K_w, m – параметри моделі зношування;

σ – контактний тиск; S – шлях тертя.

3.8 Методика експлуатаційних випробувань ковзних контактів міського електротранспорту

Експлуатаційні випробування проводились для кінцевої оцінки ефективності використання запропонованих вугільних вставок та визначення рівня надійності ковзних контактів.

3.8.1 Місце проведення випробувань

Експлуатаційні випробування проводились у м. Кременчук протягом 1 року на перегоні довжиною 40 км.

У тролейбусному депо м. Кременчук на електрорухомому складі (18-ть одиниць) були встановлені запропоновані вставки з нового матеріалу.

3.8.2 Методика вимірювання зносу контактного проводу під час експлуатаційних випробувань

Будь-який захід, спрямований на продовження строку служби контактної проводу в експлуатації, повинен спиратися на знання величини, характеру та особливостей його зносу і на правильне розуміння основних причин, що впливають на знос.

Дані по зносу проводів необхідні також для планування потреби в них і контактних вставок струмоприймачів в експлуатації на перспективу і для розробки технічно обумовлених норм зносу.

Тому стан проводу за зносом повинен характеризуватися загальними для всіх шляхів кількісними і якісними показниками.

Вимір зносу проводів виконувався згідно рекомендаціям [130] два рази на рік – весною та восени. В якості вимірювального інструменту використовувались універсальні мікрометри та вимірювальні скоби ЦНІ МПС, що дозволяють робити заміри зручніше, швидше та надійніше.

При внесенні результатів замірів з робочих блокнотів до книги стану контактного проводу обов'язково відмічалися місця вставок контактного проводу. За замірами підраховували середнє арифметичне значення висоти контактного проводу для кожного прольоту. При цьому всі заміри по вставкам контактного проводу відкидалися [130].

Контрольні заміри залишкової висоти контактного проводу проводили у точках його підвіски, напроти опор у фіксуєчого затискача, а також біля кожного струнового та живильного затискачів.

Знос контактного проводу за один рік експлуатації розраховували як різницю між виміряними висотами контактного проводу [130]:

$$H_1 = D_1 - D_0, \quad (3.17)$$

$$H_2 = D_2 - D_1, \quad (3.18)$$

$$H_3 = D_3 - D_2. \quad (3.19)$$

Загальний знос за три роки експлуатації визначався як сума зносів H_1 , H_2 і H_3 .

Кількість проходів електрорухомого складу по кожній зоні за період між замірами визначали, як [130]:

$$P = \Sigma N_{el}, \quad (3.20)$$

де N_{el} – кількість тролейбусів, що пройшли даною зоною.

Середній питомий знос контактного проводу для кожної анкерної ділянки визначали за формулою [130]:

$$i_a = \frac{H}{P \cdot 10^{-4}}. \quad (3.21)$$

Коефіцієнт нерівномірності зносу контактного проводу на анкерних ділянках визначали [130], як:

$$K_u = \frac{H_{сер.прол.}}{H_{сер.фікс.}}, \quad (3.22)$$

де $H_{сер.прол.}$ – середній знос проводу в середині прольоту;

$H_{сер.фікс.}$ – середній знос проводу у фіксаторів.

3.8.3 Методика оцінки ступеню спрацювання вставок

В експлуатації необхідно досягати найменших витрат вугільних вставок та найбільшого міжремонтного пробігу струмоприймачів [130].

Вивчення та аналіз зносу контактного проводу в експлуатації, особливо, якщо метою є порівняння ефективності застосування струмознімних вставок з різними властивостями супроводжуються вивченням і аналізом зносу самих вставок. Для цього користуються показниками питомих витрат вставок, питомого зносу і міжремонтного пробігу струмоприймачів.

Питомі витрати вставок знаходимо за формулою [130]:

$$y = \frac{Y}{P}, \quad (3.23)$$

де Y – витрата вугільних вставок по депо за період, що розглядається, тис. шт. ; P – пробіг електрорухомого складу, що розглядається, млн. км.

3.9 Математико-статистична обробка результатів експериментальних досліджень

Випробування запропонованих ковзних контактів характеризуються певним розсіянням результатів експерименту. Розсіяння неминуче і

викликається, з одного боку, факторами, пов'язаними з методикою досліджень – технікою виготовлення зразків, умовами випробувань, похибками приладів; з іншого боку - неоднорідністю досліджуваного матеріалу. Оцінку точності експериментальних даних проводили згідно з роботами [75, 139].

За окремими результатами вимірювань $X_1, X_2 \dots X_n$ розраховують середнє арифметичне значення \bar{X} за формулою:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (3.24)$$

Далі, знаходять квадрати похибок окремих вимірювань

$$(\Delta X_i)^2 = (X_i - \bar{X})^2. \quad (3.25)$$

Визначають середнє квадратичне відхилення

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}. \quad (3.26)$$

Приймають значення надійності: $\alpha=0,95$.

Використовуючи критерій Ст'юдента знаходять границі довірчого інтервалу:

$$\Delta = t_{n\alpha} \frac{S_X}{\sqrt{n}}, \quad (3.27)$$

де $t_{n\alpha}$ – коефіцієнт Ст'юдента, величина якого залежить від α та $k=n-1$ і знаходиться за таблицями статистики Ст'юдента;

n – кількість вимірювань даної величини.

Остаточний результат записують у вигляді:

$$X = \bar{X} \pm \Delta. \quad (3.28)$$

Оцінюють відносну похибку:

$$\gamma = \frac{\Delta}{\bar{X}} \cdot 100\%. \quad (3.29)$$

Якщо внаслідок математичної обробки даних експериментів відносна похибка перевищувала 10%, то визначали необхідну кількість експериментів за виразами математичної статистики.

Обробка експериментальних даних, розрахунок аналітичних залежностей та статистично-математичний аналіз здійснювали на ПЕОМ з використанням пакетів прикладних програм “Mathcad 2011 Professional”, “Statgraph 6.1”, “Microsoft Excel”.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ТА СТЕНДОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КОВЗНИХ КОНТАКТІВ

4.1 Лабораторні дослідження зразків ковзних контактів

У запропонованих ковзних контактах вміст складових компонентів варіюється у деяких межах. Тому, для встановлення найбільш раціонального складу ковзних контактів були проведені лабораторні дослідження зразків.

Зразки отриманих композицій (рис. 3.1) досліджували на міцність, твердість та електропровідність. При цьому, під № 1 та 2 були зразки із запропонованих матеріалів, під № 3 – зразки із серійних вставок, під № 4 – зразки, що отримані із відпрацьованих струмознімальних вставок типу «А» струмоприймачів електрорухомого складу залізниць (перемелюванням з наступним пресуванням та спіканням).

4.1.1 Фізико-механічні, електро- та триботехнічні властивості дослідних зразків

Важливим показником фізико-механічних властивостей дослідних зразків є твердість. Результати її середньої величини наведено на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 – Твердість дослідних зразків

Досліди показали, що найнижча твердість спостерігається у зразків № 4,

виготовлених з відпрацьованих вставок струмоприймачів електрорухомого складу залізниць. Постійне значення твердості мають зразки № 3, оскільки виготовлені вони із серійних вставок. У запропонованих матеріалах зразків № 1 та 2 твердість підвищувалась у залежності від вмісту штучних складових. Залежність твердості від вмісту природного графіту для двох зразків наведено на рис. 4.2.

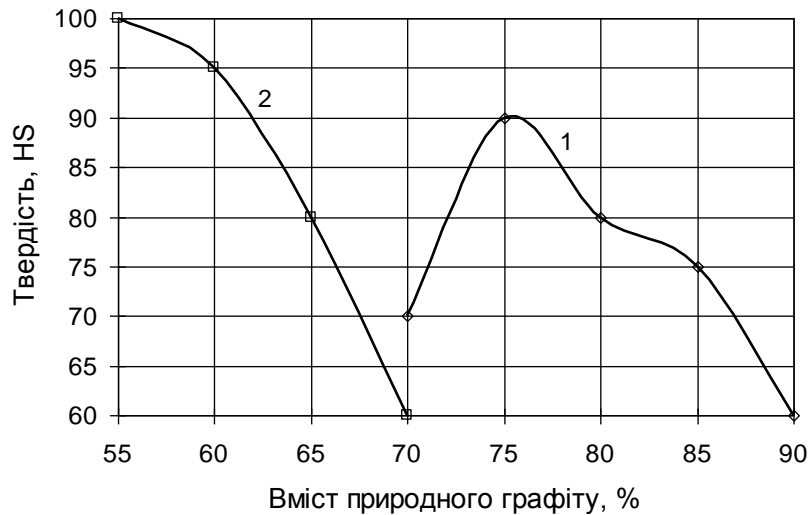


Рисунок 4.2 – Залежність твердості зразків № 1, 2 від вмісту природного графіту

Визначення раціонального складу запропонованих матеріалів ковзних контактів тільки за величиною твердості зразків не є доцільним, оскільки ця величина знаходиться в межах 60...100 HS.

Дослідні зразки підлягали визначенню міцності на стиск. Значення σ відповідали початку зміни укорочення зразків Δl . Результати представлено в табл. 4.1.

Аналіз отриманих результатів показує, що міцність зразків виготовлених із графітовмісного регенерату (зразки № 4) більше ніж у 2 рази менша міцності серійних та запропонованих матеріалів. Міцність на стиск запропонованих зразків на 8,9...12,3 % більша у порівнянні зі зразками із серійних матеріалів.

Таблиця 4.1 – Міцність дослідних зразків

Зразок №	P, Н	Δl , мм	σ , МПа	$\sigma_{\text{тимч}}$, МПа
1	756	1,23	6,82	548
2	734	1,27	6,64	526
3	678	1,38	6,07	492
4	373	1,50	2,94	258

З метою встановлення необхідної міцності проведені додаткові дослідження з оптимізації хімічного та гранулометричного складу композицій. Залежність міцності на стиск при початковій зміні укорочення Δl запропонованих матеріалів дослідних зразків від вмісту міді наведена на рис. 4.3.

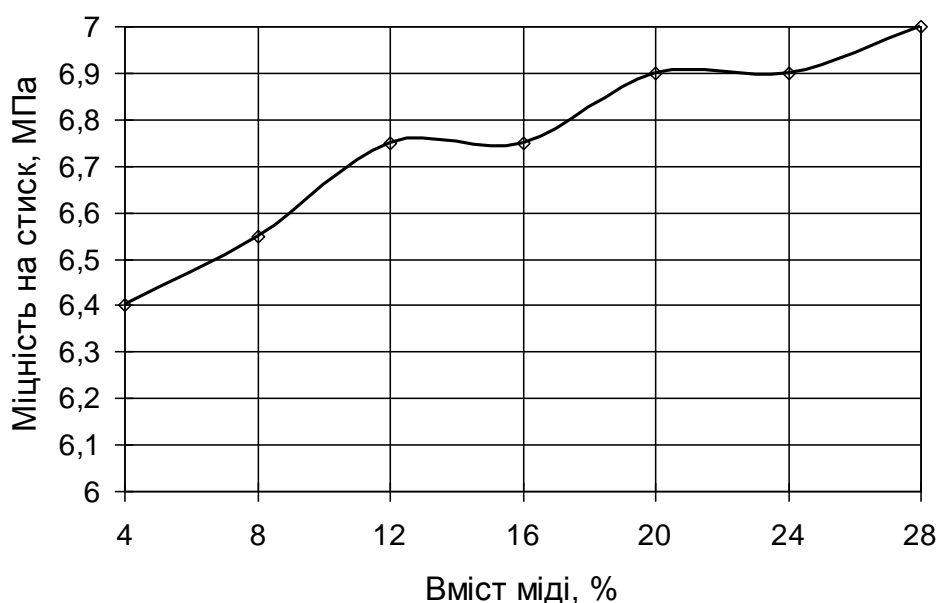


Рисунок 4.3 – Залежність міцності на стиск дослідних матеріалів від вмісту міді зразків № 1, 2

Отримані результати показують, що раціональний вміст міді в запропонованих зразках знаходиться в межах 10...20 %.

Далі були проведені дослідження з визначення питомого електроопору дослідних зразків. Результати представлені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Середній питомий електричний опір дослідних зразків

№ зразка	Питомий електроопір, Ом·мм ² /м
1	6
2	8
3	20
4	35

Як видно з табл. 4.2, питомий електричний опір запропонованих дослідних зразків № 1, 2 у 2...3 рази менше в порівнянні зі зразками із серійних вставок. Найбільший електричний опір мають зразки № 4 із графітовмісного регенерату, які отримані із відпрацьованих вставок струмоприймачів електрорухомого складу залізниць. Пояснити це можна збільшенням концентрації зв'язуючого, необхідного для виготовлення дослідних зразків.

Покажемо графічно, яким чином вміст міді у запропонованих матеріалах ковзних контактів впливає на питомий електричний опір (рис. 4.4).

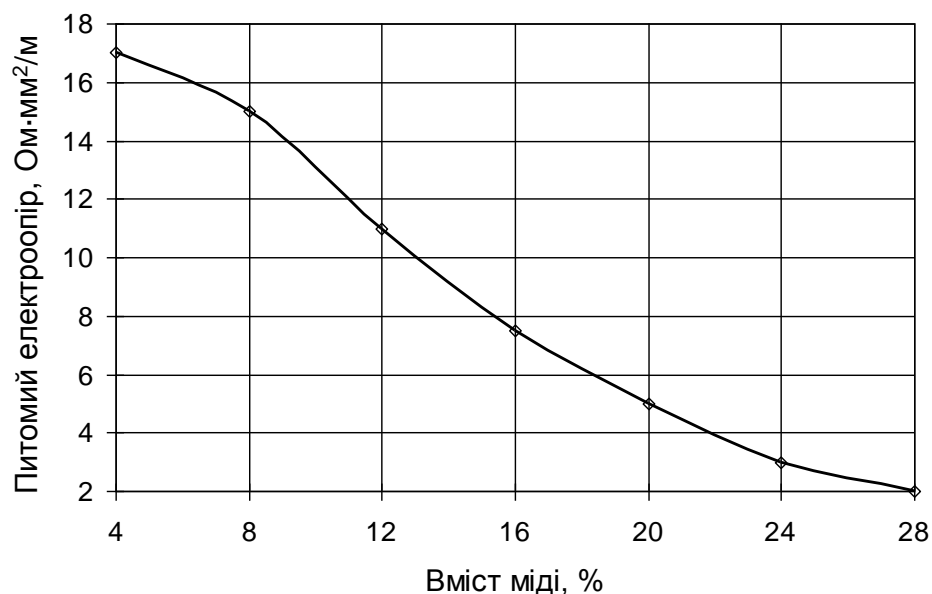


Рисунок 4.4 – Питомий електричний опір дослідних зразків № 1, 2 у залежності від концентрації міді

Дані, що приведені на рис. 4.4 узгоджуються з роботою В.Я. Берента [25].

Важливою триботехнічною властивістю у процесі експлуатації ковзних

контактів міського електротранспорту є коефіцієнт тертя. У лабораторних умовах спочатку визначали момент тертя на дослідній машині тертя, а потім розраховували коефіцієнт тертя згідно методики, наведеної в п. 3.7.4. Результати досліджень у вигляді залежності коефіцієнту тертя запропонованих зразків від обертів диска лабораторної установки ЗНМ-17 для різної концентрації міді наведені на рис. 4.5.

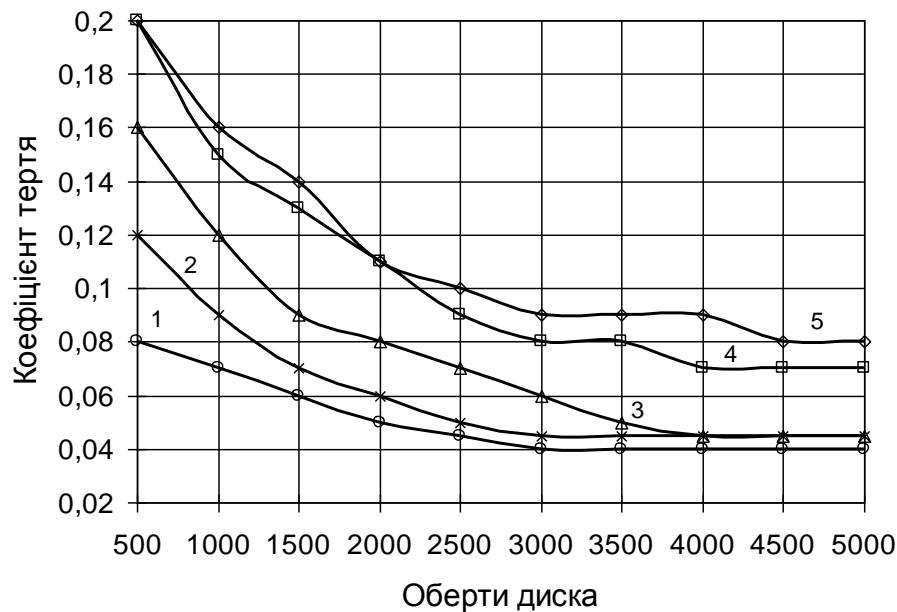


Рисунок 4.5 – Коефіцієнт тертя в залежності від кількості обертів диска установки ЗНМ-17 при концентрації міді, %:

1 – 10; 2 – 12; 3 – 18; 4 – 25; 5 – 30

Графічна залежність вказує на те, що при концентрації міді 10...18 % у запропонованих дослідних зразках № 1, 2 спостерігаються найнижчі значення коефіцієнту тертя. Крім того, майже постійні значення коефіцієнту тертя притаманні для зразків з концентрацією міді 10...12 %. Підвищені значення коефіцієнта тертя пояснюються захопленням однойменних матеріалів під час тертя при підвищенні концентрації міді у зразках. Спадання значень коефіцієнта тертя підтверджують той факт, що відбувається процес припрацювання взаємодіючих елементів з наступною стабілізацією його величини.

4.1.2 Дослідження зносостійкості зразків

Згідно методики, наведеної в п. 3.8 для визначення параметрів k_w , m моделі зносу (ф-ла (3.16)) були проведені дослідження зносостійкості лабораторних зразків № 1-4. Результати випробувань дослідних зразків за схемою паралельних циліндрів наведені в табл. 4.3. Результати досліджень лабораторних зразків ковзних контактів за схемою перехресних циліндрів представлені в табл. 4.4-4.5.

Таблиця 4.3 – Результати випробувань дослідних зразків № 1-4 за схемою паралельних циліндрів

№	Покази одометра	n	S, м	a, $\times 10^{-3}$, м			
				№1	№2	№3	№4
0	773850	0	0	0	0	0	0
1	773860	10	143	1,121	0,92	0,982	0,143
2	773900	50	715	1,600	1,196	1,313	0,715
3	773950	100	1430	1,884	1,338	1,466	1,43
4	774050	200	2860	2,175	1,597	1,570	2,86
5	774150	300	4290	2,383	1,704	1,621	4,29
6	774250	400	5720	2,421	1,751	1,647	5,72
7	774350	500	7150	2,543	1,815	1,681	7,15

Таблиця 4.4 – Результати випробувань дослідних зразків № 1-2 за схемою перехресних циліндрів

№	n	S, м	a,мм	b,мм	$A=(a \cdot b)^{1/2}$	a,мм	b,мм	$A=(a \cdot b)^{1/2}$
			№1			№2		

1	10	143	1,4	4,033	2,376	1,711	4,004	2,617
2	50	715	1,6	4,498	2,682	1,844	4,153	2,767
3	100	1430	1,796	5,298	3,084	1,86	4,293	2,825
4	200	2860	2,028	5,518	3,345	1,936	4,485	2,946
5	300	4290	2,063	5,854	3,475	2,031	4,749	3,105
6	400	5720	2,112	6,155	3,605	2,091	4,796	3,166
7	500	7150	2,163	6,426	3,728	2,098	4,953	3,223

Таблиця 4.5 – Результати випробувань дослідних зразків № 3-4 за схемою перехресних циліндрів

№	n	S, м	a, мм	b, мм	$A=(a \cdot b)^{1/2}$	a, мм	b, мм	$A=(a \cdot b)^{1/2}$
			№3			№4		
1	10	143	1,6	4,155	2,578	1,83	4,84	2,976
2	50	715	1,72	4,576	2,805	1,987	4,99	3,149
3	100	1430	1,88	5,594	3,243	2,24	5,867	3,625
4	200	2860	2,18	5,625	3,502	2,398	5,928	3,77
5	300	4290	2,23	5,889	3,624	2,486	6,245	3,94
6	400	5720	2,252	6,305	3,768	2,492	6,457	4,011
7	500	7150	2,258	6,498	3,83	2,499	6,778	4,115

За отриманими даними проведені розрахунки коефіцієнтів моделі зносу ковзних контактів і сам знос U_w . Теоретичні розрахунки зносу лабораторних зразків (за виразами (2.36) та (2.37) визначено усереднений знос зразків $U_w^T = u_z^{cep}$) і експериментальні результати збігаються. Результати наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Результати розрахунків моделі зносу для лабораторних зразків ковзних контактів

№ зразка	β	c	m	K_w	U_w , мм	U_w^T , мм
1	0,1218	0,547	3,105	$1,837 \cdot 10^{-3}$	0,24	0,26

2	0,1268	0,513	2,943	$1,249 \cdot 10^{-3}$	0,19	0,18
3	0,1173	0,580	3,262	$2,709 \cdot 10^{-3}$	0,35	0,38
4	0,1166	0,591	3,288	$3,135 \cdot 10^{-3}$	0,43	0,47

Проведені лабораторні дослідження зразків ковзних контактів показали, що запропоновані нові матеріали відрізняються від серійних тим, що у них вищі фізико-механічні, електро- та триботехнічні властивості. Крім того, лабораторні дослідження надали можливість уточнити склад запропонованих струмознімальних матеріалів ковзних контактів:

- співвідношення компонентів у першому прес-порошку складає, ваг. % [132]:

природний графіт	75,0,
мідь	18,0,
піролітичний вуглець	7,0;

- співвідношення компонентів у другому прес-порошку складає, ваг. % [133]:

природний графіт	60,0
штучний графіт	24,0
мідь	11,0
зв'язуюче	5,0.

При цьому, ніобій входить у ваговий склад природного графіту як модифікатор і складає 5...8 % від його кількості.

Далі, були проведені стендові випробування виготовлених вставок струмоприймачів тролейбуса. При цьому, порівнювались ковзні контакти – запропоновані (№1-2) та серійні.

4.2 Стендові випробування ковзних контактів

4.2.1 Величина та інтенсивність зносу ковзних контактів

На експлуатаційну надійність ковзних контактів переважаючий вплив здійснюють процеси тертя та зношування. Тому практичний інтерес викликає

величина та характер спрацювання сполучених елементів ковзних контактів в різних умовах експлуатації. В даній дисертаційній роботі при випробуваннях на установці БК-1 (рис. 3.3) намагалися створити умови більш адекватні реальним.

Під час досліджень, експериментально доведено, що чим більша площа робочої поверхні проводу, яка покрита перенесеним (намазаним) вуглецем, тим більша інтенсивність зношування елементів ковзних контактів. Крім цього виявлено, що зі зменшенням концентрації впровадженого вуглецю в мідну матрицю (завдяки проходженню хімічної реакції – процесу окислення) – інтенсивність зношування обох контактів збільшується. Інтенсивність зносу ковзних контактів збільшується при проходженні врівноважених процесів у вторинних структурах (рекристалізація) і зменшується при проходженні неврівноважених процесів (реакція розкладу окислів вуглецю) [64]. При цьому, фізичний зміст зниження інтенсивності зносу під час проходження неврівноважених реакцій між поверхнями тертя полягає в тому, що вони вимагають більших витрат енергії і відповідно до цього, знижується частка енергії тертя, яка йде на руйнування поверхні.

Дослідження величини та інтенсивності зносу проводились на зразках контактного проводу і вставок, запропонованих та серійних на установці БК-1 без подачі та з подачею струму, при цьому, для створення більш адекватних умов процесу експлуатації міського електротранспорту подавалась вода у контакт. Результати наведено в табл. 4.7.

З табл. 4.7 спостерігається підвищення величини зносу, як зразків контактного проводу, так і вставок у всіх трьох випадках при наявності струму. Під час досліджень ковзних контактів із запропонованими вставками вплив струму дещо нижчий.

Таблиця 4.7 – Показники характеристик зносу ковзного контакту, отриманих на установці БК-1 ($P=40$ Н, $V=12,4$ м/с, $S=10^4$ м, полярність проводу позитивна, без подачі води)

№ досліду	Ковзний контакт	Умови досліду	Зменшення перерізу проводу $\Delta S, \text{мм}^2$	Середня втрата ваги однієї вставки, г	Питомий знос проводу, $\text{мм}^2/\text{км}$	Середній питомий знос однієї вставки, г / км
1	Зразок проводу	I=100А	0,0602	10,9	0,006	1,09
	МФ-100 та зразок серійної вставки	Без струму	0,0583	9,8	0,006	0,98
2	Зразок проводу	I=100А	0,0528	5,9	0,005	0,59
	МФ-100 та зразок вставки № 1	Без струму	0,0524	5,7	0,005	0,57
3	Зразок проводу	I=100А	0,0445	5,2	0,004	0,52
	МФ-100 та зразок вставки № 2	Без струму	0,0442	5,1	0,004	0,51

Порівняння питомих зносів контактних проводів та вставок, серійних із запропонованими, свідчить про значне зменшення спрацювання від 1 до 3-го досліду, тобто в залежності від варіантів взаємодії елементів ковзних контактів. Деформація, що відбувається під час тертя утворює в поверхневому шарі запас надмірної енергії у вигляді порушення однорідності матеріалу з підсиленням релаксаційних процесів на робочих поверхнях контактних проводів та запропонованих вставок, які обумовлені взаємодією електронів один з одним та з дислокаціями кристалічної ґратки. Також підсилюються всі види розсіювання енергії, а неупорядкований рух атомів, лінійних, точкових та інших дефектів замінюється впорядкованим рухом. При цьому, частинки чи дефекти, що рухаються, намагаються звільнити тіло від неврівноваженості та надмірної вільної енергії. Крім того, процеси тертя інтенсифікують дифузійні потоки завдяки багатократному повторенню теплових та силових впливів при взаємних зустрічах мікронерівностей, які створюють нестационарні поля з великим

градієнтом температур та тисків.

Також на установці БК-1 виявлені залежності питомого зносу елементів системи від сили струму з подачею води у контакт (рис. 4.6, 4.7). Кожний ковзний контакт володіє особливими залежностями з відсутністю закономірної схожості.

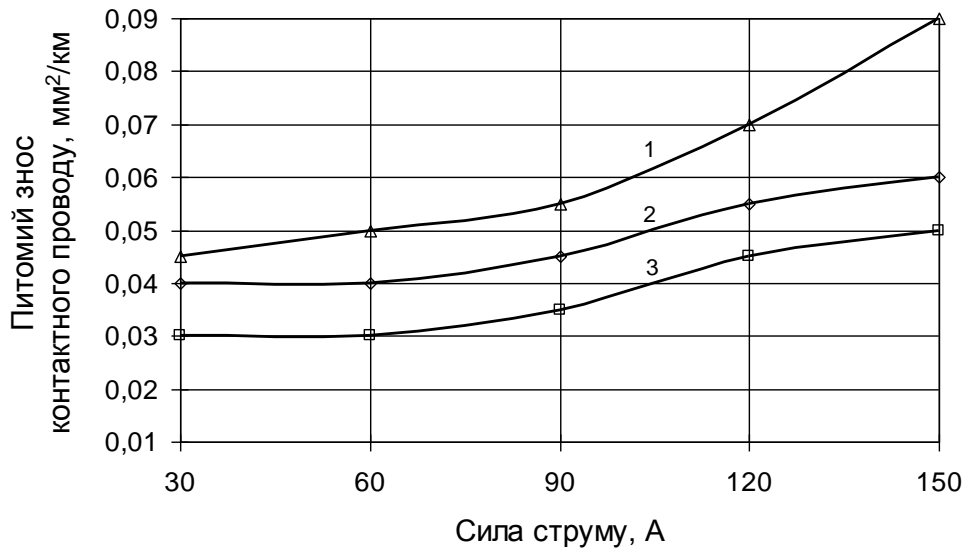


Рисунок 4.6 – Залежність середнього питомого зносу контактної провідності від сили струму під час досліджень на установці БК-1 ($P=60$ Н, $V=12,4$ м/с, $S=10^4$ м, з подачею води у контакт) у ковзних контактах: 1 – МФ-100 та серійна вставка; 2 – МФ-100 та запропонована вставка № 1; 3 – МФ-100 та запропонована вставка № 2

Наведені залежності свідчать, що питомий знос контактної провідності з подачею води у ковзний контакт дещо вищий в порівнянні з експериментами без води. Особливо це проявляється під час досліджень із серійними вставками. Під час досліджень ковзних контактів із запропонованими вставками № 1-2 подача води майже не впливає на знос контактної провідності, а підвищення сили струму приводить до зниження зносу, що вказує на більш інтенсивне проходження невірноважених процесів між робочими поверхнями контакту. Крім того, підвищення сили струму для запропонованих вставок не здійснює різкого підвищення величини зносу контактної провідності - відбувається плавне зростання.

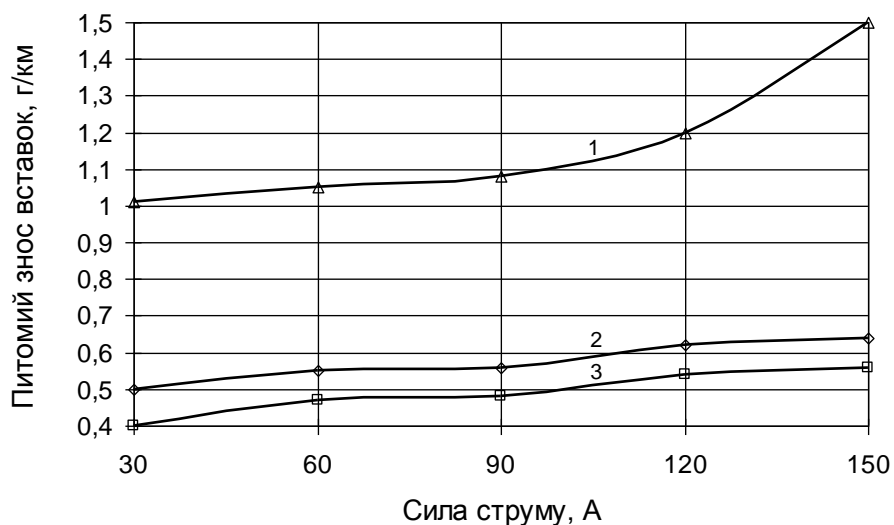


Рисунок 4.7 – Залежність середнього питомого зносу вставок від сили струму під час досліджень на установці БК-1 ($P=60$ Н, $V=12,4$ м/с, $S=10^4$ м, з подачею води у контакт) у ковзних контактах: 1 – МФ-100 та серійна вставка; 2 – МФ-100 та запропонована вставка № 1; 3 – МФ-100 та запропонована вставка № 2

Для умов випробувань, поданих на рис. 4.7, подача води у ковзний контакт на питомий знос запропонованих вставок № 1-2 суттєво не впливає. Спостерігаються випадки, коли величина зносу зменшується. Стосовно серійних вставок, то їх величина зносу більша, ніж у запропонованих у 2...3 рази, а подача води у контакт призводить до різкого підвищення величини їх зносу. Під час досліджень ковзних контактів із запропонованими вставками, їх знос має усталений характер, тобто практично не залежить від сили струму. Можна бачити, що інтенсивність зносу сполучених елементів стандартного ковзного контакту міського електротранспорту залежить від величини струму, що знімається та наявності води, тоді як при використанні запропонованих вставок № 1-2, знос струмознімальних вставок - стає усталеним, а знос самого проводу практично не залежить від величини струму, що знімається.

Результати досліджень на знос свідчать про те, що в досліджуваній парі тертя ковзного контакту протікають невірноважені реакції відновлення вуглецю міддю завдяки наявності в матеріалі природного графіту з

модифікатором ніобієм.

4.2.2 Контактний електроопір

Результати вимірювання контактного опору при нерухомому контакті проводу із запропонованими та серійними вставками показали, що при силі натиснення менше 40 Н він значно підвищується. Теж саме відбувалося і при натисненні більше 100 Н. Це можна пояснити макродеформацією струмознімальних вставок, що в результаті змінювало фактичну площу ковзного контакту. Проведені вимірювання контактного опору за методикою поданою в п. 3.7.2 у залежності від сили натиснення та сили струму при рухомому контакті без подачі води у контакт наведені в табл. 4.8.

Дані таблиці показують, що оптимальним натисненням вставки на контактний провід є зусилля 60...80 Н. Це можна пояснити макродеформацією ковзного контакту, що в результаті змінювало фактичну площу контакту. При цьому досягається найнижчий контактний електроопір, величина якого практично співпадає з тією, що отримана під час дослідів при нерухомому контакті.

Сила струму має суттєвий вплив на контактний опір. При поступовому підвищенні сили струму, майже у всіх випадках він різко знижується. Це можна пояснити зростанням розмірів контактних плям. В деяких випадках в окремих ковзних контактах, знижується твердість сполучених елементів та руйнуються поверхневі плівки, чого не відбувається в ковзних контактах із запропонованими матеріалами вставок.

Таблиця 4.8 – Середній контактний електроопір ковзного контакту в залежності від сили струму та сили натиснення на установці БК-1 ($V=12,4$ м/с, $S=10^4$ м)

№ досліджу	Ковзний контакт	Сила струму, А	Середній контактний електроопір, $\times 10^{-3}$, Ом					
			Сила натиснення, Н					
			20	40	60	80	100	120
1	Зразок проводу МФ-100 та зразок серійної вставки	30	40	28	21	23	29	29
		60	36	25	16	17	19	18
		90	35	21	12	14	15	17
		120	28	17	9	11	13	15
		150	19	14	9	10	11	14
2	Зразок проводу МФ-100 та зразок вставки № 1	30	26	21	17	18	21	23
		60	22	19	13	14	18	19
		90	20	15	9	10	14	16
		120	17	12	7	7	10	12
		150	12	10	5	6	9	11
3	Зразок проводу МФ-100 та зразок вставки № 2	30	31	21	15	17	20	21
		60	27	17	11	14	15	16
		90	19	15	8	10	12	13
		120	14	10	7	8	9	10
		150	10	8	6	6	7	8

З табл. 4.8 спостерігається нижчий контактний електроопір у ковзних контактах із запропонованими вставками № 1-2 порівняно з контактом із серійними вставками в 1,3...1,9 рази.

З метою наближення до експлуатаційних умов роботи міського електротранспорту та для більш чіткої уяви про залежність контактного електроопору від сили струму з подачею води у контакт були проведені дослідження, результати яких показані на рис. 4.8.

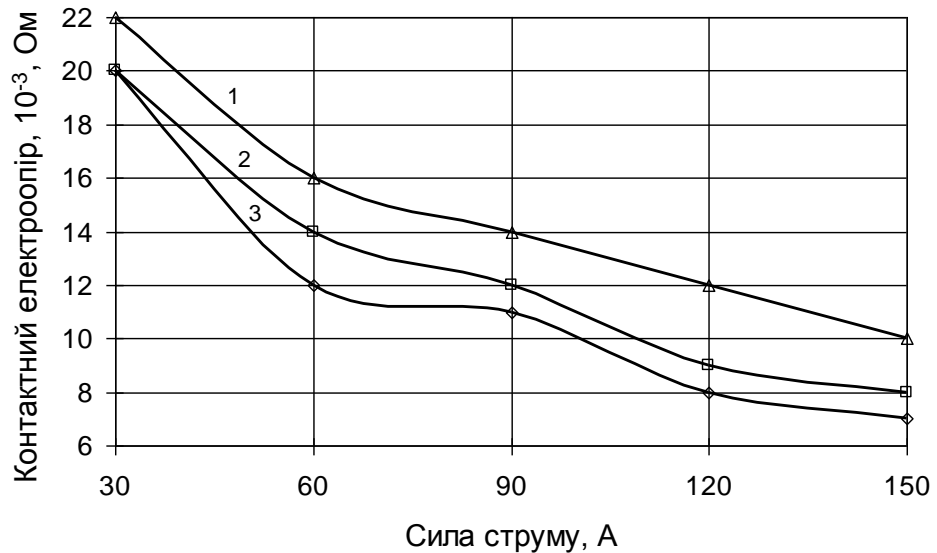


Рисунок 4.8 – Залежність середнього контактної опору між проводом і вставкою під час досліджень на установці БК-1 ($P=60$ Н, $V=12,4$ м/с, $S=10^4$ м, з подачею води у контакт) у ковзних контактах: 1 – МФ-100 та серійна вставка; 2 – МФ-100 та запропонована вставка № 1; 3 – МФ-100 та запропонована вставка № 2

З графіків, наведених на рис. 4.8 можна бачити, що контактний електроопір усіх ковзних контактів з подачею води у контакт дещо вищий, ніж без води.

Залежність контактної опору для всіх ковзних контактів від струму - нелінійна, що пояснюється напівпровідниковими властивостями окисної плівки на контактному проводі. Контактний опір у ковзних контактах із застосуванням запропонованих вставок нижче в 1,1...1,4 рази порівняно з ковзними контактами із серійними вставками.

Величина і характер спрацювання взаємодіючих елементів ковзних контактів передусім залежить від таких триботехнічних характеристик як шорсткість поверхні, коефіцієнт тертя, температура в зоні контакту та інших. Розглянемо їх більш детально.

4.2.3 Шорсткість поверхні

Про якість ковзного контакту можна судити за зовнішнім виглядом поверхонь тертя, по мікроструктурі сполучених елементів і за мікрогеометрією останніх.

Відомо [73, 103, 104], що мікрогеометрія робочих поверхонь тертя ковзних контактів суттєво впливає на їх надійність та працездатність. Значний вплив мікрогеометрії відбувається на стадії припрацювання, коли від шорсткості робочих поверхонь тертя ковзних контактів залежить величина початкового зносу і, як наслідок, наступна працездатність ковзного контакту в експлуатації. Під час припрацювання шорсткість поверхонь змінюється, набуваючи врівноваженого стану, а інтенсивність зношування приймає мінімальне стає значення. На характер формування мікрогеометрії робочих поверхонь ковзних контактів великий вплив здійснює зовнішнє середовище. У процесі досліджень отримано профілограми робочої поверхні тертя контактного проводу після взаємодії із серійними і запропонованими вставками (Додаток В, рис. В.1). Вони показують, що шорсткість (за ГОСТ 2789-79) контактних проводів коливається в межах: в парі з серійними вставками 2...3 мкм, у деяких випадках – 5...10 мкм; із запропонованими вставками – 4...5 мкм, інколи 6...8 мкм.

4.2.4 Коефіцієнт тертя

Відомо, що чим нижче коефіцієнт тертя, тим менша сила тертя, а отже і величина зносу. У процесі досліджень фіксувався момент тертя на установці БК-1, який у визначений момент часу мав різні значення. Після чого розраховувався коефіцієнт тертя.

Початок нормальної експлуатації, тобто кінець процесу припрацювання поверхонь тертя ковзних контактів експериментально фіксували за стабілізацією моменту сили тертя.

Характеристика процесу припрацювання і періодичності процесу зовнішнього тертя пов'язана з формуванням і руйнуванням вторинних структур. Про це свідчить зміна моменту сили тертя і коефіцієнта тертя в залежності від режимів та пройденого шляху вставкою по контактному проводу на установці БК-1 (табл. 4.9, рис. 4.9).

Таблиця 4.9 – Момент сили тертя ковзних контактів у залежності від пройденого шляху ($P=60$ Н, $I=100$ А, $V=12,4$ м/с)

Шлях тертя, м	Момент сили тертя, Н·м		
	Ковзний контакт		
	МФ-100 та серійна вставка	МФ-100 та дослідна вставка № 1	МФ-100 та дослідна вставка № 2
1	2	3	4
2000	4,98	3,59	2,44
4000	4,88	3,60	2,23
6000	4,24	3,27	2,03
8000	4,12	3,05	2,03
10000	4,05	2,82	2,03
15000	4,01	2,45	1,63
20000	3,58	2,23	1,63
25000	2,88	2,22	1,83
30000	2,78	2,03	1,63
35000	2,58	1,83	1,63
40000	2,48	2,03	1,63
45000	2,36	2,03	1,63
50000	2,48	2,03	1,42

З табл. 4.9 та рис. 4.9 можна констатувати, що процес припрацювання для ковзних контактів із серійними вставками закінчується при шляху тертя в 20000 м, а при застосуванні запропонованих вставок № 1-2 – після 10000 м. Крім того, коефіцієнт тертя ковзних контактів із запропонованими вставками в 1,2...2,5 рази менше порівняно з контактами з серійними вставками.

Характер зміни моменту сили тертя в процесі припрацювання свідчить про наявність своєчасного теплофізичного процесу, що виникає на початку тертя.

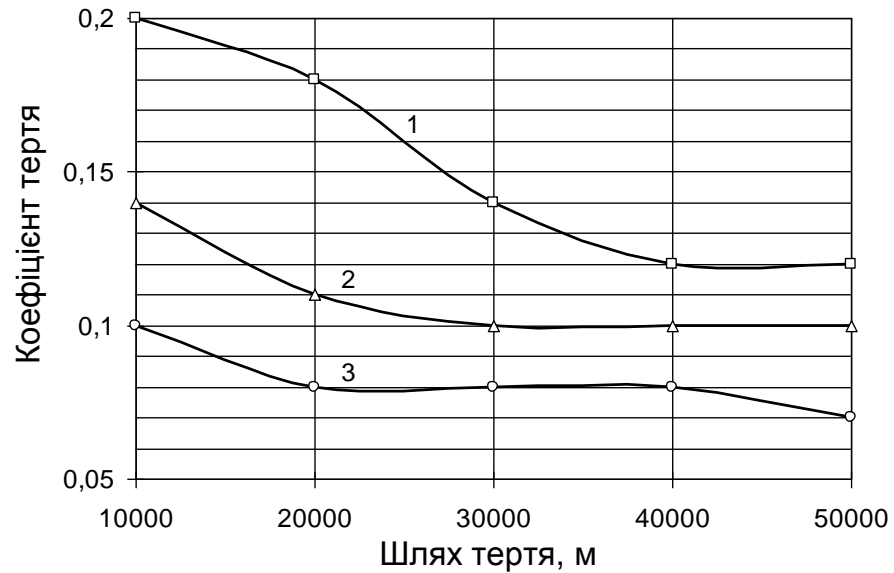


Рисунок 4.9 – Залежності коефіцієнту тертя від шляху тертя ($P=60$ Н, $I=100$ А, $V=12,4$ м/с) у ковзних контактах: 1 – МФ-100 та серійна вставка; 2 – МФ-100 та запропонована вставка № 1; 3 – МФ-100 та запропонована вставка № 2

Також були побудовані графіки залежності коефіцієнту тертя від шляху тертя ковзних контактів на установці БК-1 з подачею води у контакт, які наведені на рис. 4.10.

Графіки залежності коефіцієнту тертя ковзних контактів від шляху тертя на установці БК-1 з подачею води у контакт свідчать про ту ж саму тенденцію зміни величини коефіцієнта тертя, що і на рис. 4.9.

Для ковзних контактів із серійними та запропонованими вставками значення коефіцієнту тертя дещо вищі при дослідженнях з подачею води у контакт, ніж без неї.

4.2.5 Температура в зоні контакту

Початок і кінець припрацювання в ковзному контакті експериментально можна визначити за зміною температурного режиму в зоні контактної взаємодії. Результати досліджень температури в зоні ковзного контакту на установці БК-1 наведено в табл. 4.10.

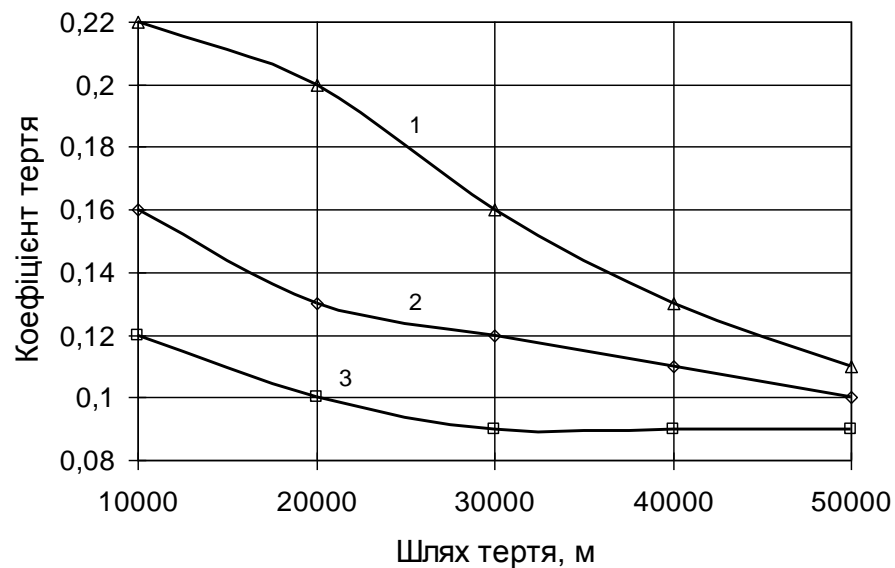


Рисунок 4.10 – Залежності коефіцієнту тертя від шляху тертя ($P=60$ Н, $I=100$ А, $V=12,4$ м/с, з подачею води у контакт) у ковзних контактах: 1 – МФ-100 та серійна вставка; 2 – МФ-100 та запропонована вставка № 1; 3 – МФ-100 та запропонована вставка № 2

З отриманих результатів впливає наступне: для всіх досліджуваних ковзних контактів, при підвищенні сили струму зростає температура в зоні тертя; тривалість випробувань, тобто шлях тертя, практично не змінює значення температури, а якщо і змінює, то в межах $1...10^{\circ}\text{C}$.

Разом з тим, можна бачити тенденцію зниження температури під час досліду першого серійного ковзного контакту після 30000 м пройденого шляху, в 2, 3-му ковзному контактах відбувається зниження температури вже після 20000 м пройденого шляху.

Таблиця 4.10 – Температура в зоні тертя в залежності від сили струму та шляху тертя на установці БК-1 (P=60 Н, V=12,4 м/с)

№ дос-ліду	Ковзний контакт	Шлях тертя, м	Температура в зоні контакту, °С					
			Сила струму, А					
			0	30	60	90	120	150
1	Зразок проводу МФ-100 та зразок серійної вставки	10000	40	45	51	64	76	89
		20000	37	43	50	63	76	90
		30000	31	41	45	58	72	87
		40000	30	41	44	56	70	87
		50000	31	41	45	57	70	87
2	Зразок проводу МФ-100 та зразок вставки № 1	10000	38	41	45	54	68	84
		20000	31	42	43	54	66	82
		30000	30	41	42	53	65	80
		40000	30	41	42	53	65	80
		50000	30	41	42	53	65	80
3	Зразок проводу МФ-100 та зразок вставки № 2	10000	39	44	46	57	68	85
		20000	33	41	44	56	67	84
		30000	33	41	44	54	67	84
		40000	32	41	43	54	65	84
		50000	33	41	44	53	67	83

Вищенаведене свідчить, що в першому ковзному контакті відбувається припрацювання до 30000 м шляху тертя на установці БК-1, а в 2 та 3-му ковзних контактах – початок і кінець припрацювання зафіксувати не вдається при наявності струму. Це доводить відсутність процесу припрацювання. Без струму, у 2 та 3-му контактах процес припрацювання відбувається до 20000 м.

Для наближення до експлуатаційних умов ковзних контактів міського електротранспорту на установці БК-1 в контакт подавалась вода. У процесі досліджень були побудовані графіки залежності температури від пройденого шляху тертя (рис. 4.11).

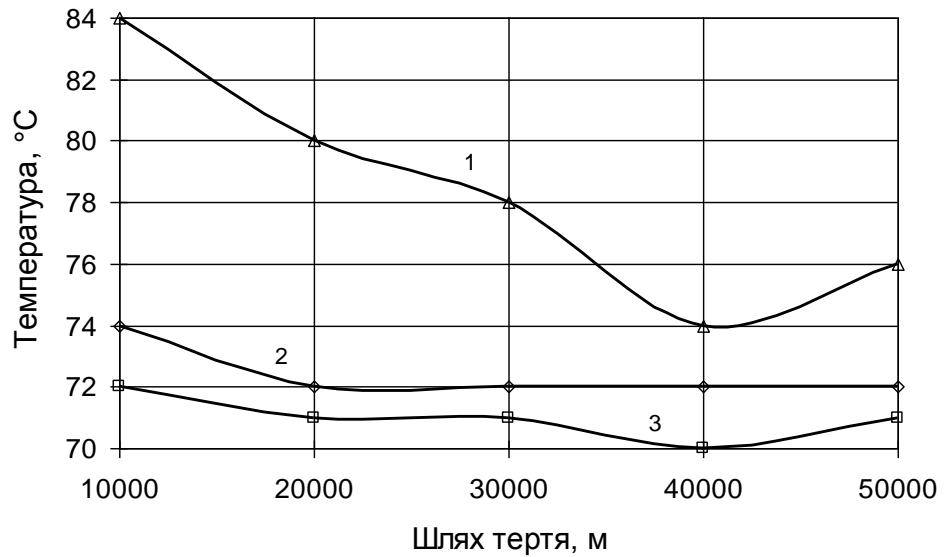


Рисунок 4.11 – Залежність температури в зоні контакту від шляху тертя на установці БК-1 ($P=60$ Н, $I=150$ А, $V=12,4$ м/с, з подачею води у контакт) у ковзних контактах: 1 – МФ-100 та серійна вставка; 2 – МФ-100 та запропонована вставка № 1; 3 – МФ-100 та запропонована вставка № 2

Температура в ковзному контакті з подачею води, в залежності від шляху тертя, на установці БК-1 дещо нижче, ніж без води. Хоча, характер зміни температури аналогічний тому, що представлений у табл. 4.10.

4.3 Структура та субструктура робочих поверхонь ковзного контакту

Структура поверхні тертя контактної провладу під час досліджень на установці БК-1 при взаємодії із серійними та запропонованими вставками відрізняється від структури віддалених шарів більш дрібнозернистою будовою, що вказує на подрібнення зерен міді, збільшення густини дислокацій та на текстурованість структури. Також проявляються темні вкраплення, які являють собою вуглець, що утворився в результаті хімічної реакції відновлення міді вуглецем. Цей вуглець разом із мідною матрицею виступають у ролі вторинних структур, що зазначається у роботі [62].

У процесі досліджень була досліджена мікроструктура поверхонь контактних провладів після взаємодії із серійними та запропонованими вставками на установці БК-1. Установлено, що поверхневий взаємодіючий шар контактних провладів відрізняється від віддалених шарів більш крупнішою будовою зерен. Це означає, що поверхневі шари пройшли процес рекристалізації. Окремі двійники, які утворилися під час нагрівання зустрічаються біля поверхні тертя та в зернах, що віддалені від робочої поверхні.

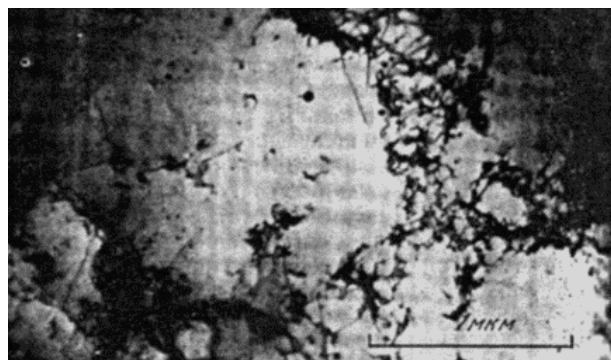
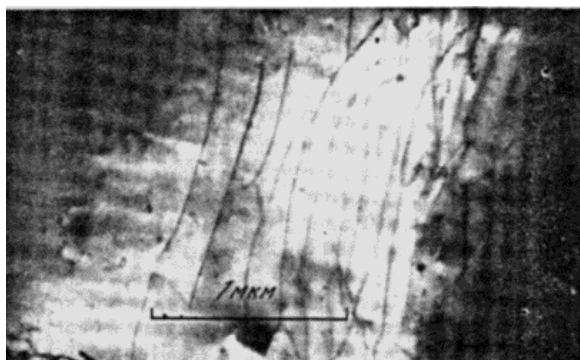
Процес рекристалізації, практично при тих же досліджуваних режимах на установці БК-1 після тертя, не відбувається на контактних провладах при взаємодії із запропонованими вставками № 1-2. Крім того, зерна в структурі поперечного перерізу контактної провладу після випробувань із запропонованими вставками майже нічим не відрізняються від зерен вихідної структури. Це означає, що знеміцнення робочої поверхні контактної провладу відбувається при більш напружених режимах, тобто при вищих значеннях температури в ковзному контакті. В окремих випадках знеміцнення робочої поверхні контактної провладу відбувається частково.

До початку проведення випробувань було досліджено хімічний склад поверхневих шарів зразків мідних контактних провладів та після взаємодії із серійними та запропонованими зразками. Для вивчення елементного складу

поверхні застосовували оже-електронну спектроскопію. При цьому на поверхні контактного проводу спостерігається незначна кількість кисню та вуглецю (енергія електронів складає 500 та 250 еВ). Основу шару складає мідна матриця.

Вміст кисню і вуглецю підвищується після взаємодії із запропонованими вставками № 1-2. Підвищена концентрація вуглецю і кисню призводить до зміцнення поверхневого шару контактного проводу.

Після взаємодії контактного проводу із запропонованими вставками на установці БК-1 фіксувався розвиток дислокаційної структури робочої поверхні міді (рис. 4.12).



а

б

Рисунок 4.12 – Електронні фотографії розвитку дислокаційної структури робочої поверхні контактної проводу в процесі взаємодії із запропонованими вставками № 1-2 на установці БК-1 при шляху тертя:

а – 10000 м; б – 50000 м

Як видно з рисунків, густина дислокацій при збільшенні величини шляху тертя швидко збільшується. Також було виявлено фактор, який суттєво впливає на вихід дислокацій і утворення бар'єрного шару. Це - сама поверхня, місце стоків мікрodefektів. Завдяки цьому фактору поблизу поверхні густина

дислокацій мінімальна, але вона нарощується за глибиною, що і є модельною схемою утворення градієнту густини дислокацій.

Фізико-механічні властивості контактного проводу прямопропорційно залежать від субструктури мідної матриці, а точніше від розмірів блоків, щільності дислокацій, величини спотворення кристалічної ґратки міді. Ці величини були визначені за допомогою рентгеноструктурного методу. Результати досліджень наведені в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Характеристики поверхневого шару контактного проводу МФ-100 до і після випробувань на установці БК-1 ($I=150$ А, $P=60$ Н, $S=50000$ м)

Поверхневий шар контактного проводу МФ-100 на глибині 10мкм	Величина мікроспотворень, $\times 10^{-4}$	Розмір блоків, $\times 10^{-5}$ м	Щільність дислокацій, $\times 10^{14}$ м ⁻²
до випробувань	10	118	263
після взаємодії із серійними вставками	15	109	283
після взаємодії із запропонованими вставками № 1	19	101	296
після взаємодії із запропонованими вставками № 2	22	96	322

Значення щільності дислокацій кристалічної ґратки мідної матриці контактного проводу після взаємодії із серійними та запропонованими вставками підвищується в залежності від шляху тертя на 7,6...22,4 %.

Як відомо [33, 143, 162], обривання періодичності ґратки викликає зміни координації поверхневих атомів та молекул, порядку їх розташування і міжатомних відстаней. Підвищена активність підсилює фізичні та хімічні явища, які протікають при контактах з іншими поверхнями та зовнішнім

середовищем. Зазначене, також буде відбуватися при експлуатаційній взаємодії запропонованих вставок та контактних проводів. Особливо, буде підсилюватися фізична адсорбція та дифузія, а також відбуватиметься прискорення утворення вторинних структур [62].

Аналіз даних, отриманих на основі рентгенографічного методу, дозволив зробити наступні висновки. Під час взаємодії струмознімальної вставки та контактного проводу відбуваються хімічні реакції, а також дифузійні процеси вуглецю в мідну матрицю, тобто період кристалічної ґратки до зовнішньої поверхні зменшується. Процес розчинення атомів вуглецю супроводжується формуванням на робочій поверхні контактного проводу мідної плівки. Підтвердженням цьому є проведений аналіз рентгенограм, який показав, що ця плівка є вуглецево-мідною і володіє системою інтерференційних ліній, які її так характеризують. Відсутність розмиття інтерференційних ліній на дифрактограмах вказують на те, що щільність дислокацій у поверхневому шарі контактного проводу після взаємодії із запропонованими вставками № 1-2 із шляхом тертя 50000 м на декілька порядків нижче, ніж у поверхневому шарі мідного контактного проводу до взаємодії. Рухливість точок виходу дислокацій на поверхню проводу після взаємодії із запропонованими вставками викликає їх інтенсивне підсилення великою кількістю вакансій, що утворилися в процесі електромеханічної взаємодії. Інтенсивність такого процесу не дає розмиття ліній на дифрактограмі, але деякі плями на них свідчать про початок формування відносно великих ділянок металу, що повністю вільні від спотворень кристалічних ґрат. Подібна картина спостерігається при рентгенівському дослідженні відпаленої після деформації міді [62], у процесі її рекристалізації. Тобто, при протіканні такого процесу на робочій поверхні мідного контактного проводу утворюються вторинні структури.

Підсумовуючи вищенаведене, зазначимо, що проведені фізико-хімічні дослідження складу, структури та властивостей мідно-вуглецевої плівки дають підстави висунути припущення про те, що поверхневий шар контактного проводу після взаємодії із запропонованими вставками № 1-2 перебуває в невірноваженому стані. Крім того, в процесі його формування спостерігаються

дифузійні процеси вуглецю в мідну матрицю та хімічні реакції відновлення вуглецю міддю, а підвищена концентрація вуглецю під час взаємодії призводить до зміцнення поверхневих шарів контактного проводу та утворення на його робочій поверхні вторинних структур.

Усі процеси, що протікають у приповерхневому та в тонкому шарі ковзного контакту, впливають на розвиток усієї сукупності фізико-хімічних та фізико-механічних процесів.

4.4 Фізико-механічні властивості елементів ковзного контакту у процесі взаємодії

Оскільки на надійність та довговічність ковзного контакту міського електротранспорту значний вплив здійснюють фізико-механічні властивості взаємодіючих елементів, то, далі, наводяться результати досліджень фізико-механічних властивостей елементів ковзного контакту у процесі взаємодії.

Твердість і мікротвердість.

Для того, щоб з'ясувати, як впливають струмознімальні вставки на властивості контактного проводу в процесі випробувань була досліджена мікротвердість мідних зразків за глибиною поверхневого шару контактних проводів після взаємодії із серійними та запропонованими вставками № 1-2. Результати наведені на діаграмі (рис. 4.13).

Наведені результати мікротвердості поверхневих шарів контактних проводів (рис. 4.13) після взаємодії із запропонованими вставками на 12,5...16,6 % вище мікротвердості ніж при взаємодії із серійними вставками.

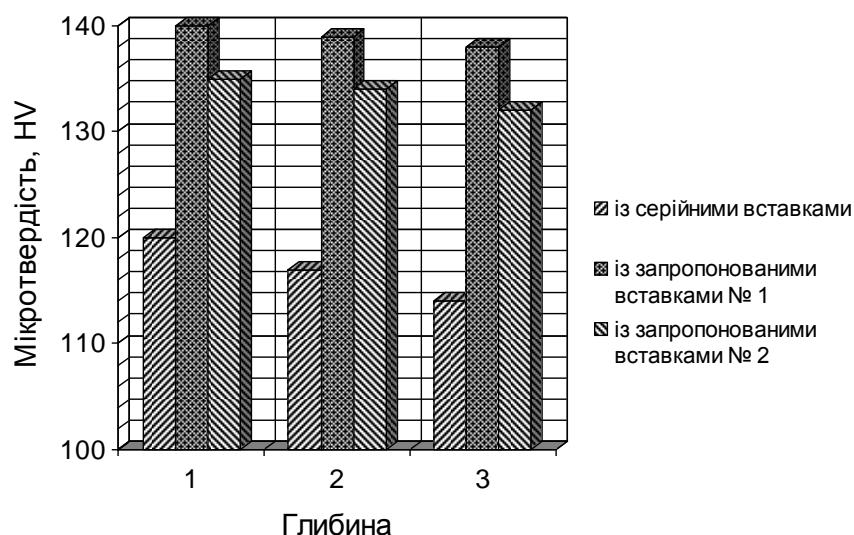


Рисунок 4.13 – Діаграма залежності мікротвердості зразків контактного проводу після взаємодії із вставками на установці БК-1 за глибиною:

1 – на робочій поверхні; 2 – на глибині 0,1 мм; 3 – на глибині 1 мм

Під час досліджень встановлено, що розмір зерна в поверхневому шарі контактного проводу складає: близько 15 мкм – після взаємодії із серійними вставками; біля 7...9 мкм – після взаємодії із запропонованими вставками № 1; біля 8...10 мкм – після взаємодії із запропонованими вставками № 2. На відстані від поверхневого шару 0,1 мм: після взаємодії із серійними вставками – 19..24 мкм; після взаємодії із запропонованими вставками № 1 – 9 мкм; після взаємодії із запропонованими вставками № 2 – 9..10 мкм. На відстані від поверхневого шару 2 мм: після взаємодії із серійними вставками 21,6..22,8 мкм; після взаємодії із запропонованими вставками № 1 – 10...11 мкм; після взаємодії із запропонованими вставками № 2 – 11...12,5 мкм.

Значення мікротвердості за глибиною поверхневого шару контактних проводів після випробувань на установці БК-1 із струмознімальними вставками з подачею води у контакт наведені в табл. 4.12.

З таблиці спостерігаються різні значення мікротвердості шарів контактного проводу в залежності від відстані вимірювань, а також від видів взаємодії ковзних контактів.

Таблиця 4.12 – Мікротвердість контактного проводу за глибиною від

поверхневого шару після взаємодії із вставками на установці БК-1 з подачею води в контакт ($P=60$ Н, $V=12,4$ м/с, $S=20000$ м, $I=150$ А)

№ дос-ліду	Ковзний контакт	Глибина від робочої поверхні контактного проводу, мм	Мікротвердість шарів контактного проводу за Віккерсом, НV
1	Зразок проводу МФ-100 та зразок серійної вставки	0	119
		0,1	92
		2	107
2	Зразок проводу МФ-100 та зразок вставки № 1	0	138
		0,1	125
		2	127
3	Зразок проводу МФ-100 та зразок вставки № 2	0	132
		0,1	128
		2	125

Мікротвердість зразків контактного проводу з подачею води в контакт при тривалих випробуваннях із серійними вставками нижче на 13...36 НV у порівнянні із запропонованими.

Твердість струмознімальних вставок в експлуатації міського електротранспорту є важливим показником при взаємодії елементів ковзного контакту. Твердість струмознімальних вставок впливає на їх стійкість у відношенні електромеханічного зношування. Користуючись склероскопічним методом визначили твердість вставок, як після виготовлення, так і після взаємодії із контактними проводами. Результати наведені на діаграмі (рис. 4.14).

Твердість запропонованих вставок № 1-2 на 7...15 НS вище порівняно з твердістю серійних вставок. Така сама картина спостерігається і після їх взаємодії із контактними проводами.

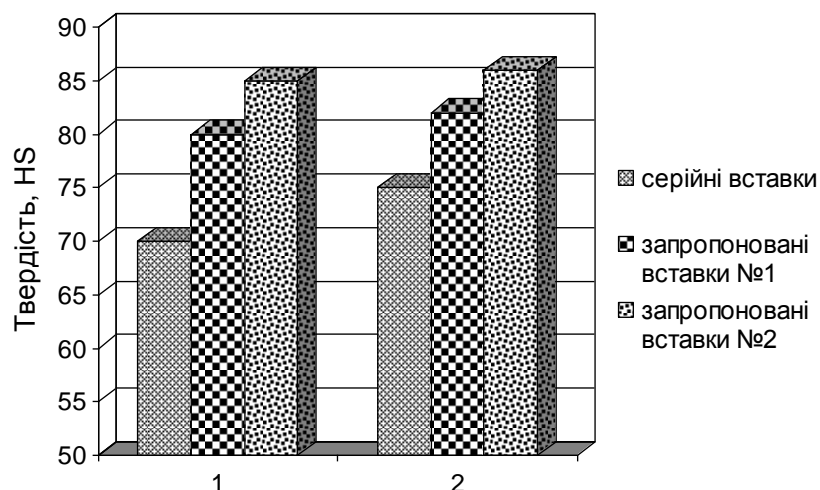


Рисунок 4.14 – Залежність твердості струмоznімальних вставок: 1 – заново виготовлених; 2 – після взаємодії із контактним проводом із шляхом тертя у 15000 м

Границя міцності.

Для визначення зміни механічних властивостей контактного проводу після взаємодії із серійними та запропонованими вставками № 1-2 були проведені випробування на розрив, згідно методики поданої в п. 3.5.2.

Результати випробувань наведені на рис. 4.15.

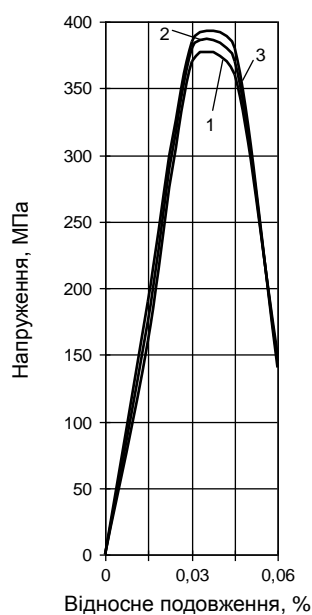


Рисунок 4.15 – Діаграми розтягу контактного проводу МФ-100 після взаємодії на установці БК-1 із шляхом 25000 м із вставками: 1 – серійними; 2 – запропонованими № 1; 3 – запропонованими № 2

На діаграмах видно, що характер розтягу мідних контактних проводів однаковий, але значення величини тимчасового опору після взаємодії із запропонованими вставками № 1-2 на 10...20 МПа вище, а відносне подовження – не змінюється. Проведений ряд випробувань дав змогу визначити середні показники границі міцності та відносного подовження контактних проводів.

Дослідження міцності на стиск виготовлених вставок показали такі ж самі результати, які наведені в табл. 4.1 цього розділу для зразків ковзних контактів.

Температура рекристалізації контактного проводу.

Під час експлуатації ковзних контактів міського електротранспорту, тобто при взаємодії вставок з контактним проводом під час струмознімання, останній підлягає нагріванню. При цьому, відбувається знеміцнення його робочого поверхневого шару. Для виявлення поведінки контактних проводів під час нагрівання, тобто при електромеханічній взаємодії із серійними та запропонованими вставками, було досліджено залежність тимчасового опору розтягу контактних проводів від тривалості взаємодії з вставками на установці БК-1. Результати досліджень наведені на рис. 4.16.

Аналізуючи наведений графік залежності тимчасового опору контактного проводу після взаємодії з вставками, можна стверджувати, що температура рекристалізації контактних проводів після взаємодії з серійними вставками складає близько 150...200°C; після взаємодії з запропонованими вставками № 1 – 190...200°C, а № 2 – 200...210°C. Характерним є те, що на робочій поверхні контактних проводів після взаємодії з запропонованими вставками № 1-2 не спостерігається відпалу цієї поверхні. Крім того, температура в зоні ковзного контакту практично не впливає на тимчасовий опір контактних проводів у процесі взаємодії з запропонованими вставками.

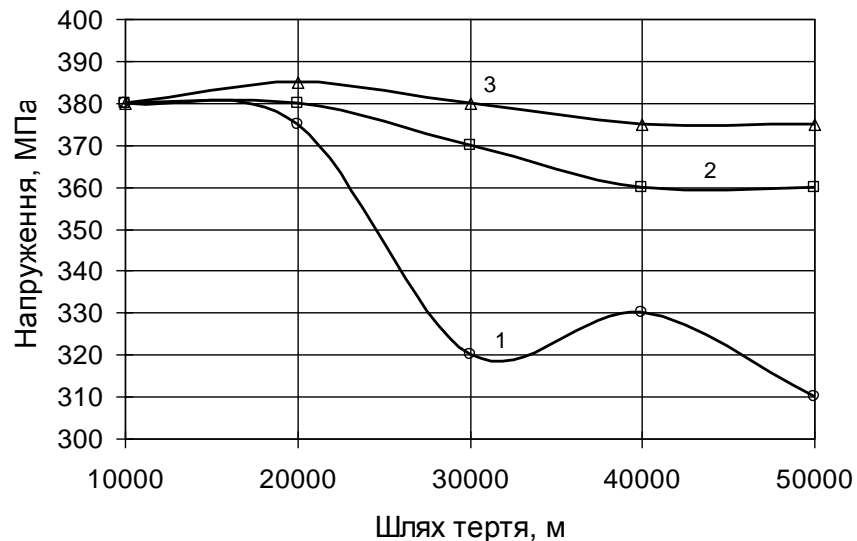


Рисунок 4.16 – Графік залежності тимчасового опору розтягу контактного проводу МФ-100 від шляху тертя ($I=150$ А) після взаємодії із: 1 – серійними вставками; 2 – запропонованими вставками № 1; 3 – запропонованими вставками № 2

4.5 Висновки

Отримані результати експериментальних досліджень фізико-механічних, електро- та триботехнічних властивостей ковзних контактів із серійними та запропонованими струмознімальними вставками надали можливість зробити наступні висновки.

1. Лабораторні дослідження зразків ковзних контактів підтвердили теоретичні положення щодо підвищення їх надійності, а саме ресурсу, та надали можливість уточнити склад теоретично запропонованих струмознімальних матеріалів. За отриманими лабораторними даними проведені розрахунки коефіцієнтів моделі зносу ковзних контактів і сам знос U_w . Теоретичні розрахунки зносу лабораторних зразків і експериментальні результати збігаються. Так, знос для запропонованих вставок № 1 складає 0,24 мкм, для вставок № 2 – 0,19 мкм, для серійних вставок – 0,35 мкм.

2. Стендові дослідження ковзних контактів реальних розмірів показали, що середній питомий знос запропонованих вставок менше за серійні в 1,7...2,1

рази. Під час взаємодії контактного проводу з запропонованими вставками, його питомий знос нижче на 16,7...33,3 % у порівнянні з ковзним контактом із серійними вставками. Подача води у ковзний контакт на питомий знос запропонованих вставок № 1-2 суттєво не впливає, при цьому, величина зносу серійних вставок більша за запропоновані у 2...3 рази, а подача води у контакт призводить до різкого підвищення величини їх зносу.

Наявність та значення сили струму в ковзних контактах із запропонованими вставками на величину зносу обох елементів практично не впливала. Результати свідчать, що в досліджуваній парі тертя ковзного контакту протікають неврівноважені реакції відновлення вуглецю міддю завдяки наявності в матеріалі природного графіту з модифікатором ніобієм.

3. Контактний електроопір ковзних контактів із запропонованими вставками № 1-2 у порівнянні із контактом із серійними вставками нижче в 1,3...1,9 рази. Подача води у контакт призвела до підвищення контактного електроопору, але, при застосуванні запропонованих вставок він нижче в 1,1...1,4 рази в порівнянні з серійними.

4. На установці БК-1 встановлено, що процес припрацювання для ковзних контактів із серійними вставками закінчується при шляху тертя в 20000 м, а при застосуванні запропонованих вставок № 1-2 – після 10000 м. Крім того, коефіцієнт тертя ковзних контактів із запропонованими вставками в 1,2...2,5 рази менше в порівнянні із контактами з серійними вставками.

На температуру в зоні ковзного контакту практично не впливала тривалість випробувань, а сила струму прямо пропорційно підвищувала температуру для всіх досліджуваних ковзних контактів.

5. Дослідження субструктури робочої поверхні контактного проводу показали, що значення щільності дислокацій кристалічної ґратки мідної матриці після взаємодії із серійними та запропонованими вставками підвищується в залежності від шляху тертя на 7,6...22,4 %.

6. Фізико-механічні властивості досліджуваних ковзних контактів показали такі якості. Мікротвердість поверхневих шарів контактних проводів після взаємодії з запропонованими вставками на 12,5...16,6 % вище

мікротвердості, ніж при взаємодії з серійними вставками. Твердість запропонованих вставок № 1-2 на 9,3...21,4 % вище в порівнянні з твердістю серійних вставок. Аналогічна картина спостерігається і після їх взаємодії із контактними проводами. Температура рекристалізації контактних проводів після взаємодії з серійними вставками складає близько 150...200°C; після взаємодії з запропонованими вставками № 1 – 190...200°C, а № 2 – 200...210°C. Характерним є те, що на робочій поверхні контактних проводів після взаємодії з запропонованими вставками № 1-2 не спостерігається відпалу цієї поверхні. Крім того, температура в зоні ковзного контакту практично не впливає на тимчасовий опір контактних проводів у процесі взаємодії з запропонованими вставками.

РОЗДІЛ 5
**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ТЕХНІКО-
ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ
ЗАПРОПОНОВАНИХ КОВЗНИХ КОНТАКТІВ МІСЬКОГО
ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ**

5.1 Експлуатаційні дослідження ковзних контактів

Після проведення стендових досліджень ковзних контактів із серійними та запропонованими струмознімальними вставками проведені дослідження поведінки запропонованих ковзних контактів в експлуатаційних умовах міського електротранспорту у порівнянні з серійними. Експлуатаційні дослідження проведені за методикою, яка наведена в п. 3.8.

Розглянемо отримані результати випробувань ковзних контактів міського електротранспорту.

5.1.1 Величина зносу контактного проводу

Запропоновані заходи, спрямовані на підвищення надійності та працездатності ковзних контактів міського електротранспорту в процесі експлуатації повинні привести до зниження величини їх зносу.

Дані щодо зносу контактних проводів необхідні для перспективного планування експлуатаційної потреби в проводах і для розробки технічно-обумовлених норм зносу.

У процесі експлуатаційних досліджень встановлено, що заміри зносу лише у фіксаторів, навпроти опор, і в середині прольоту не надають змоги вияснити характер зносу. Тому заміри, незалежно від величини середнього зносу, робили в точках, помітного на «око», підвищеного місцевого зносу контактного проводу.

Експлуатаційні показники величини зносу контактної провуду за 2010-2011 рр. наведено на рис. 5.1. Розрахунок проводили згідно методики, наведеної в п. 3.8.

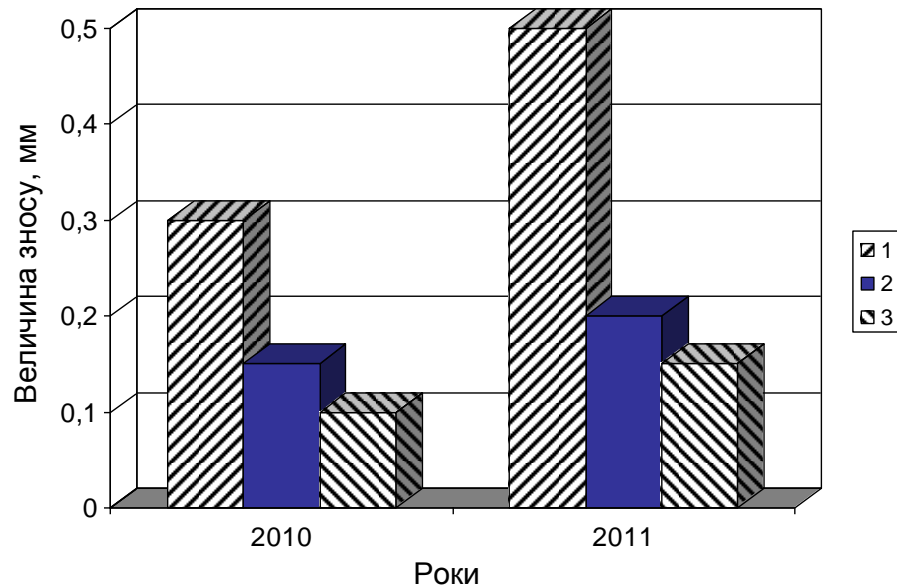


Рисунок 5.1 – Середній знос контактної провуду МФ-100 впродовж 2010-2011 рр. при взаємодії із: 1 – серійними вставками; 2 – запропонованими вставками № 1; 3 – запропонованими вставками № 2

Можна бачити, що середній знос контактної провуду при взаємодії із серійними вставками в 2,0...2,5 рази вище в порівнянні із зносом контактної провуду при взаємодії із запропонованими вставками № 1-2, а сам знос у багатьох місцях досягає 0,3...0,4 мм. Висота перерізу контактної провуду при взаємодії із запропонованими вставками рівномірно розподілена за довжиною, а знос не перевищує 0,10...0,15 мм.

Різниця у величині зносу контактної провуду вказує на те, що під час струмознімання запропонованими вставками № 1-2 відбуваються невірноважені процеси, які, в свою чергу, інтенсифікують проходження процесів самоорганізації.

Рівномірність зносу контактної провуду при взаємодії із запропонованими вставками вказує на те, що вони виступають "каталізаторами" для більш інтенсивного проходження процесів самоорганізації між поверхнями

ковзного контакту. У цьому випадку, ковзні контакти знаходяться в стані неврівноваженості.

Кількість проходів електрорухомого складу по кожній зоні за період між замірами визначали за ф-лою 3.20. Статистичні дані, отримані у тролейбусному депо м. Кременчук (відповідні акти наведено в Додатку Г).

Середній питомий знос контактного проводу визначали за ф-лою 3.21.

Результати розрахунків представлені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Експлуатаційні показники зносу контактного проводу впродовж 2011-2012 рр. тролейбусних ліній м. Кременчук під час взаємодії із стандартними та запропонованими вставками

№ дільниці	Кількість проходів струмоприймачів		Середній питомий знос, мм ² /10 ⁴ проходів струмоприймачів	
	2011 р.	2012 р.	2011 р.	2012 р.
1*	33584	32560	0,0267	0,0276
2*	30256	29856	0,0231	0,0234
3	29526	28938	0,1254	0,1562
4	31262	30454	0,1248	0,1520
5**	23128	22984	0,0172	0,0174

* – на міському електротранспорті використовувались запропоновані вставки № 1;

** – на міському електротранспорті використовувались запропоновані вставки № 2

З таблиці слідує, що середній питомий знос контактного проводу під час взаємодії із запропонованими вставками нижче в 4...9 рази у порівнянні із зносом контактних проводів, що взаємодіяли із стандартними вставками.

Середній знос контактного проводу на всіх трьох досліджуваних ділянках більш рівномірний, тобто при взаємодії із запропонованими композиційними вставками знижується спрацювання контактного проводу за всією довжиною ділянки. Аналіз зносу проводів буде неповним, якщо не враховувати характер і величину зносу вставок струмоприймачів.

5.1.2 Величина зносу вставок

За період експлуатаційних досліджень на протязі 2011-2012рр, під час яких на міський електротранспорт (18-ть тролейбусів) було встановлено запропоновані вставки № 1-2, велися спостереження за характером та величиною їх зносу.

Усі запропоновані вставки на 18-ти тролейбусах, на даний момент продовжують експлуатуватися. Вони показали себе з найкращої сторони, навіть, під час ожеледиці в зимовий період року.

Під час експлуатаційних досліджень запропонованих вставок не спостерігали пропилів, тріщин та мікросколів, а також електроерозійних каверн.

Статистичні спостереження середнього зносу за висотою всіх запропонованих струмознімальних вставок та вставок в стані поставки (взяті вибірково, кількість і умови роботи приблизно однакові) за їх шириною після середнього пробігу міського електротранспорту 50 км графічно представлені на рис. 5.2.

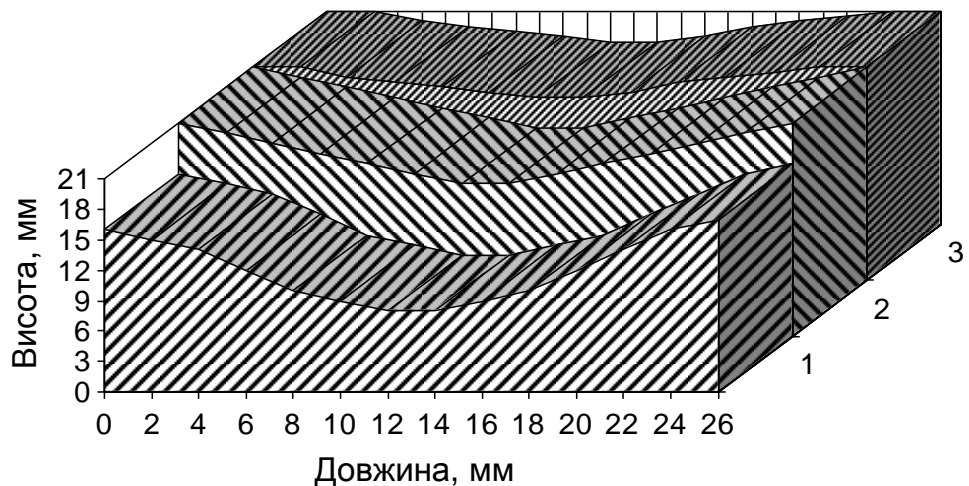


Рисунок 5.2 – Середній знос вставок за висотою після середнього пробігу тролейбусів 50 км: 1 – серійні вставки; 2 – запропоновані вставки № 1; 3 – запропоновані вставки № 2

Як видно з рис. 5.2, середній знос запропонованих вставок в 1,9...2,3 рази нижче зносу серійних вставок міського електротранспорту. Очевидно, таке знижене зношування відбувається завдяки підвищеним фізико-механічним та триботехнічним властивостям, а також фізико-хімічній взаємодії матеріалів ковзних контактів, які виникають в трибосистемі із струмозніманням під впливом механічної складової. Досягненнями запропонованих вставок № 1-2 є і їх більша рівномірність спрацювання.

На протязі 2-х років експлуатації міського електротранспорту проводились дослідження запропонованих вставок та вибірково серійних вставок. Підраховувалися середня втрата ваги вставок після кожних 100 км пробігу тролейбусів, а також величина середнього зносу. Результати представлені на рис. 5.3.

Спостерігається незначна зміна втрати ваги вставок, у межах 10%, як для запропонованих, так і для серійних вставок в залежності від пробігу тролейбусів. Порівнюючи гістограми на рис. 5.3 можна сказати, що середній знос серійних вставок у 2...3 рази вище в порівнянні із запропонованими № 1-2. Через кожні 100 км пробігу міського електротранспорту величина середнього зносу практично постійна для всіх видів вставок.

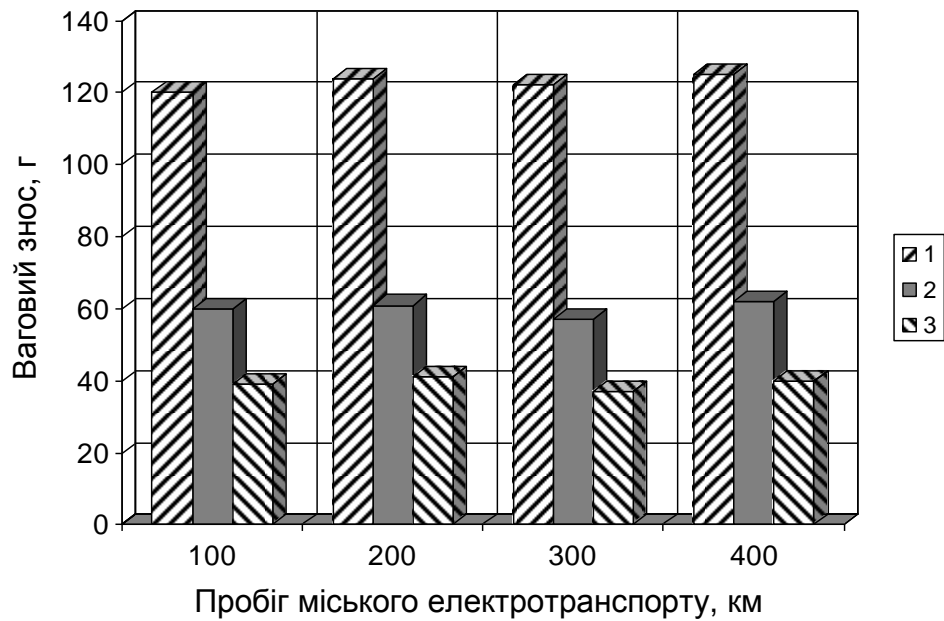


Рисунок 5.3 – Гістограма середнього вагового зносу пари вставок на кожні 100 км пробігу міського електротранспорту для: 1 – серійних вставок; 2 – запропонованих вставок № 1; 3 – запропонованих вставок № 2

При експлуатаційних дослідженнях запропонованих ковзних контактів міського електротранспорту, особливу увагу приділяли стану і характеру зносу контактного проводу. В акті "про хід експлуатаційних випробувань запропонованих вставок" (Додаток Г) подано висновок, що за час досліджень, величина зносу проводу не підвищилась в порівнянні з минулими роками. Характер зносу не змінився.

Середньорічні питомі витрати вставок по Кременчуцькому тролейбусному депо в 2010-2011 рр. складали 12-16 шт. на 1 тис. км пробігу міського електротранспорту. Якщо ж перейти на запропоновані вставки, то за рахунок зниження величини їх зносу питомі витрати значно знизяться і сягнуть 4...8 шт. на 1 тис. км пробігу.

5.2 Техніко-економічна ефективність застосування запропонованих ковзних контактів міського електротранспорту

Економія від впровадження нових ковзних контактів виражається у скороченні, в першу чергу, потреб в міді, а також у зменшенні витрат на заміну зношених контактного проводу та вставок новими.

Згідно табл. 5.1 для подальших розрахунків приймемо наступні середні питомі значення зносу для контактного проводу: при взаємодії із серійними вставками – мінімальне значення $i_{\text{сер}}^{\text{ном}} = 0,0538 \text{ мм}^2/10^4$ проходів струмоприймачів та максимальне значення $i_{\text{сер}}^{\text{вст}} = 0,0276 \text{ мм}^2/10^4$ проходів струмоприймачів при взаємодії із запропонованими вставками.

Знаючи середні питомі значення зносу, можна розрахувати термін експлуатації контактний проводу, що заново підвісили до його заміни за зносом [130] за ф-ою:

$$t_k = \frac{\Delta S_{\text{зм}} \cdot n \cdot 10^4}{i \cdot P_{\text{річ}}}, \quad (5.1)$$

чи

$$t_k = \frac{\Delta S_{\text{зм}} \cdot n \cdot 0,89 \cdot 10^4}{m_k \cdot P_{\text{річ}}}, \quad (5.2)$$

де $\Delta S_{\text{зм}}$ – середній знос проводу до моменту його зміни, $\Delta S_{\text{зм}} = 30 \text{ мм}^2$;

n – кількість контактних проводів в підвісці, $n=1$;

$P_{\text{річ}}$ – кількість проходжень струмоприймачів міського електротранспорту, що планується на майбутній рік;

m_k – питома втрата міді контактним проводом, в кг/1000км пробігу, $m_k = 0,89 \text{ і}$.

Залежність прогнозованого терміну служби контактний проводу від кількості проходів струмоприймачів міського електротранспорту $P_{\text{річ}}$

представлена на рис. 5.4.

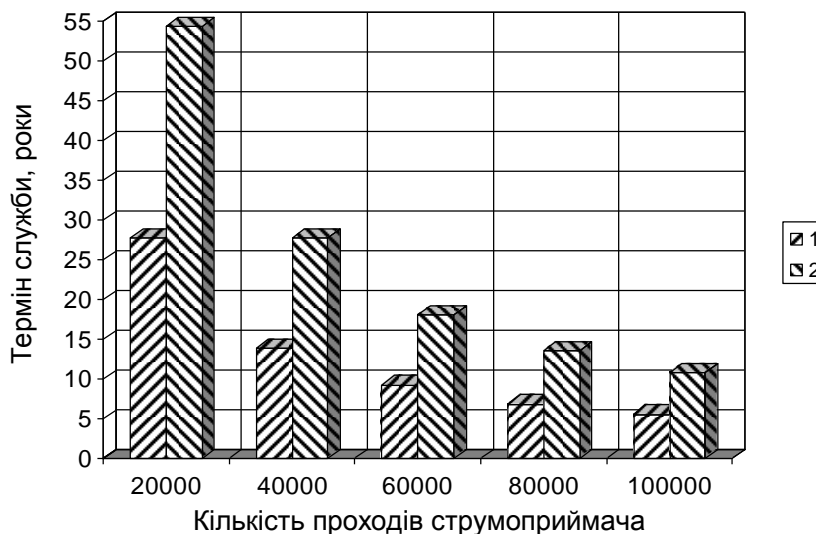


Рисунок 5.4 – Залежність терміну служби контактної провладу МФ-100 від кількості проходів струмоприймача міського електротранспорту при взаємодії із: 1 – серійними вставками; 2 – запропонованими вставками

Можна бачити, що прогнозований термін служби контактних провідів МФ-100 при взаємодії із запропонованими вставками вище більше ніж у 2 рази в порівнянні з терміном служби провладу при взаємодії із серійними вставками.

Розрахувати скорочення питомої втрати міді, в кг/1000км пробігу, згідно [130], можна за ф-ою:

$$\Delta m_{\kappa} = m_{\kappa} - m_{\kappa}^M, \quad (5.3)$$

де m_{κ}^M – питома втрата міді контактним провладом при взаємодії із запропонованими вставками, в кг/1000км пробігу, $m_{\kappa}^M = 0,89i^M$.

Відповідно до значення $i_{\text{сеп}}^{\text{норм}} = 0,0538 \text{мм}^2/10^4$ проходів струмоприймачів, розрахуємо m_{κ} для середньоарифметичного значення середнього питомого зносу контактної провладу при взаємодії із серійними вставками,

$m_k=0,0478$ кг/1000 км пробігу, а для значення $i_{\text{сер}}^{\text{вст}}=0,0276$ мм²/10⁴ проходів струмоприймачів при взаємодії із запропонованими вставками $m_k^{\text{м}}=0,0245$ кг/1000 км пробігу.

Питома економія міді, в кг/1000км пробігу, розраховується за ф-ою [121]:

$$\Delta g_k = \Delta m_k \frac{S \cdot K_{\text{спр}}}{\Delta S_{\text{зм}}}, \quad (5.4)$$

де S – переріз нового проводу, мм²;

$K_{\text{спр}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову потребу в проводі для виконання спряжень, $K_{\text{спр}}=1,07$.

Результати розрахунків представлені в табл. 5.2.

З табл. 5.2 видно, що якщо контактний провід буде експлуатуватися в парі із запропонованими вставками № 1, то відбудеться скорочення питомої втрати міді на 0,083 кг/10³ км пробігу, якщо ж із запропонованими вставками № 2 – то на 0,115 кг/10³ км пробігу.

Річна економія міді, в т/рік, згідно [130]:

$$\Delta G_k = \Delta g_k \cdot R_{\text{річ}}, \quad (5.5)$$

де $R_{\text{річ}}$ – річний пробіг міського електротранспорту, що планується на рік, млн. км/рік.

На рис. 5.5 представлено графіки залежності річної економії контактного проводу в залежності від річного пробігу міського електротранспорту.

Таблиця 5.2 – Питомі показники втрати та економії міді контактними проводами

/П	Заходи	Середній питомий знос контактного проводу, мм ² /10 ⁴ проходів струмоприймачів	Скороч ення питомої втрати міді, Δm_{κ} , кг/10 ³ км пробігу	Питом а економія міді, Δg_{κ} , кг/10 ³ км пробігу
	Заміна серійних вставок на запропоновані № 1	0,0276	0,0233	0,083
	Заміна серійних вставок на запропоновані № 2	0,0174	0,0323	0,115

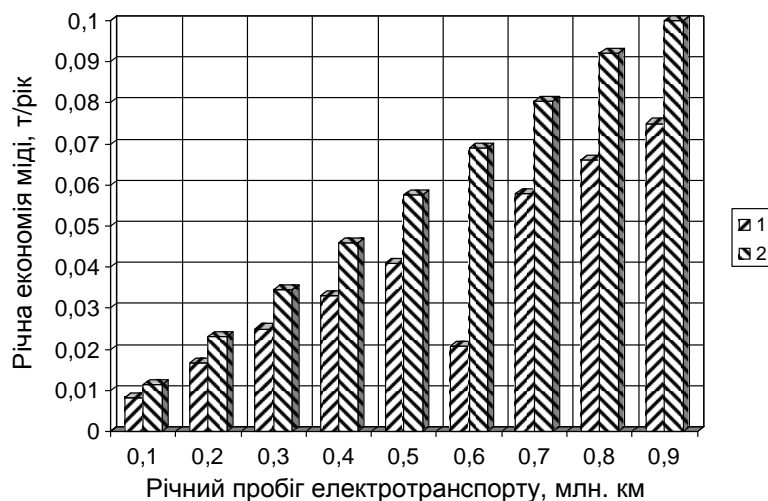


Рисунок 5.5 – Річна економія міді в залежності від річного пробігу при проведенні заходів заміною серійних вставок на: 1 – запропоновані № 1; 2 – запропоновані № 2

З діаграм можна бачити, що всі заходи доцільно застосовувати в найширших обсягах, економія міді при цьому складе до 0,1 т/рік у залежності від пробігу міського електротранспорту.

Питомі експлуатаційні витрати, пов'язані з періодичною заміною зношеного проводу новим (реновацією), в грн./1000км пробігу можна

визначити за формулою:

$$C_{\text{к.рен}} = \frac{\left(C_{\text{к.нов.}} - \frac{S - \Delta S_{\text{зм}}}{S} C_{\text{к.знош}} + C_{\text{к.роб}} \right) m_{\text{к}}}{\frac{\Delta S_{\text{зм}}}{S} 10^3}, \quad (5.6)$$

де $C_{\text{к.нов.}}$ – ціна нового контактного проводу, $C_{\text{к.нов.}} = 112000$ грн/т; $C_{\text{к.знош}}$ – ціна міді, що здається у металобрухт, $C_{\text{к.знош}} = 17600$ грн/т; $C_{\text{к.роб}}$ – витрати праці, пов'язані із заміною контактного проводу, які залежать від умов роботи, $C_{\text{к.роб}} = 27300$ грн/т.

Зниження питомих експлуатаційних витрат, пов'язаних з періодичною заміною контактних проводів, при впровадженні в експлуатацію нових вставок можна знайти за ф-ою:

$$\Delta C_{\text{к.рен}} = C_{\text{к.рен}}^n - C_{\text{к.рен}}^m, \quad (5.7)$$

де $C_{\text{к.рен}}^n$ – питомі експлуатаційні витрати, пов'язані із заміною зношеного контактного проводу на новий при взаємодії із серійними вставками, грн./1000км пробігу, $C_{\text{к.рен}}^n = 42,176$ грн/1000км пробігу міського електротранспорту; $C_{\text{к.рен}}^m$ – питомі експлуатаційні витрати, пов'язані із заміною зношеного контактного проводу новим при взаємодії із запропонованими вставками, грн/1000км пробігу.

Розрахунки зниження питомих експлуатаційних витрат при впровадженні нових запропонованих вставок подано в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Показники питомих експлуатаційних витрат при заміні контактного проводу та вставок струмоприймача

№ п/п	Заходи	Питоми експлуатаційні витрати, $C_{к.рен}^M$, грн/1000км пробігу міського електротранспорту	Зниження питомих експлуатаційних витрат, $\Delta C_{к.рен}$, грн./1000км пробігу
1	Заміна серійних вставок на запропоновані № 1	11,4	30,77
2	Заміна серійних вставок на запропоновані № 2	11,6	30,97

Можна бачити, що зниження питомих експлуатаційних витрат складає до 25 грн/1000км пробігу міського електротранспорту.

Річні експлуатаційні витрати віднесені на 1км однієї лінії, згідно [130], розраховуються за ф-ою:

$$E_{к.річ} = C_{к.рен} \cdot P_{річ} \cdot 10^{-3}, \quad (5.8)$$

а скорочення цих витрат (річна економія):

$$\Delta E_{к.річ} = \Delta C_{к.рен} \cdot P_{річ} \cdot 10^{-3}. \quad (5.9)$$

Скорочення експлуатаційних витрат, які віднесені до 1км однієї лінії в залежності від планової річної кількості проходів струмоприймачів міського електротранспорту показані на рис. 5.6.

Спостерігається майже однакове скорочення експлуатаційних витрат при заміні серійних вставок на запропоновані № 1-2. Величина скорочень у залежності від річного пробігу міського електротранспорту складатиме 310...1550 грн /млн. км.

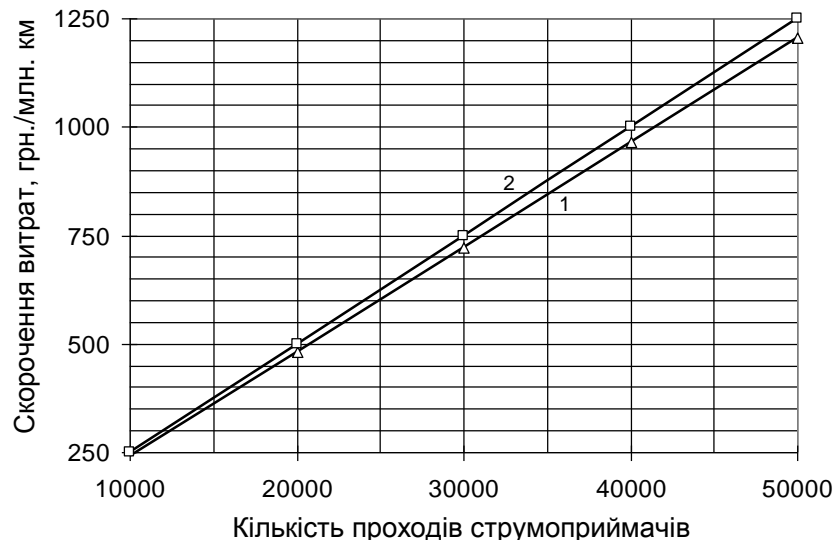


Рисунок 5.6 – Скорочення річних експлуатаційних витрат в залежності від кількості проходів струмоприймачів міського електротранспорту при заміні серійних вставок на: 1 – запропоновані № 1; 2 – запропоновані № 2

5.3 Висновки

На підставі результатів вивчення зносу контактного проводу і струмознімальних вставок, визначення навантажувальної здатності і надійності, техніко-економічних розрахунків можна зробити наступні висновки.

1. Середній питомий знос контактної проводу при взаємодії із запропонованими струмознімальними вставками на міському електротранспорті знижується в 4...9 рази у порівнянні із зносом контактних проводів, що взаємодіяли із серійними вставками. Крім того, середній знос контактної проводу на всіх трьох досліджуваних ділянках більш рівномірний, тобто при взаємодії із запропонованими композиційними вставками знижується спрацювання контактної проводу за всією довжиною ділянки.

2. Середній знос запропонованих вставок в 1,9...2,3 рази нижче зносу серійних вставок міського електротранспорту. Очевидно, таке знижене зношування відбувається завдяки підвищеним фізико-механічним та триботехнічним властивостям, а також фізико-хімічній взаємодії матеріалів

ковзних контактів, які виникають у ковзному контакті із струмозніманням під впливом механічної складової. Досягненнями запропонованих вставок № 1-2 є рівномірність розподілення зносу за робочою поверхнею.

Через кожні 100 км пробігу міського електротранспорту під час експлуатації величина середнього вагового зносу запропонованих ковзних контактів практично постійна.

3. Середньорічні питомі витрати вставок по Кременчуцькому тролейбусному депо в 2010-2011 рр. знизилась у 2...4 рази при застосуванні запропонованих вставок.

4. Прогнозований термін служби контактних проводів при взаємодії із запропонованими вставками більше ніж у 2 рази в порівнянні з терміном служби проводу при взаємодії із серійними вставками.

5. Скорочення питомої втрати міді контактним проводом при експлуатації в парі із запропонованими вставками № 1 відбудеться на 0,083 кг/10³ км пробігу, а в парі із запропонованими вставками № 2 – на 0,115 кг/10³ км пробігу.

У залежності від пробігу міського електротранспорту економія міді при застосуванні запропонованих ковзних контактів складає до 0,1 т/рік, а зниження питомих експлуатаційних витрат складає до 31 грн/1000км пробігу міського електротранспорту.

6. При заміні серійних вставок на запропоновані № 1-2, спостерігається майже однакове скорочення експлуатаційних витрат, а величина скорочень у залежності від річного пробігу міського електротранспорту складає 310...1550 грн./млн. км.

7. Співставлення технічних можливостей, економічних показників і врахування фактору "часу віддачі" різноманітних заходів із подовження терміну служби контактних проводів показує, що реальним способом вирішення такої задачі для міського електротранспорту є застосування нових запропонованих ковзних контактів. Цю задачу краще вирішувати проведенням заходів, що здійснюються як в контактній мережі, так і на струмоприймачах міського електротранспорту.

8. Експлуатаційні дослідження поведінки запропонованих ковзних контактів показують, що наряду з найвищою економічністю вони забезпечують також високу надійність та ефективність експлуатації контактної підвіски і струмоприймачів міського електротранспорту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена наукова задача підвищення надійності ковзних контактів міського електротранспорту шляхом створення та виготовлення контактів з матеріалів, які володіють підвищеними фізико-механічними, електро- та триботехнічними властивостями. Головні наукові та прикладні результати досліджень полягають у наступному.

1. З математичної точки зору, урахувавши напружено-деформований стан робочої поверхні ковзного контакту вперше отримано математичну модель динаміки зношування для визначених початкових умов, розв'язуючи яку та враховуючи геометрію вихідного стану ковзного контакту можна знайти зміщення, тобто знос, а потім визначити утворений переріз при відповідному пробігу та експлуатаційних навантаженнях міського електротранспорту. Крім того, розв'язання цієї системи рівнянь відкриває можливість шляхом комп'ютерного моделювання визначити силові, кінематичні, динамічні та енергетичні параметри, необхідні для проектування ковзних контактів та оцінки їх експлуатаційних можливостей.

2. Обґрунтовано можливість підвищення надійності ковзних контактів міського електротранспорту шляхом застосування нових композиційних матеріалів. Для порівняння тих, що застосовувались та нових ковзних контактів міського електротранспорту запропоновано закономірність зміни інтенсивності їх зносу за геометричними параметрами, яка показує, що зменшення інтенсивності зносу відбудеться при підвищенні їх фізико-механічних, електро- та триботехнічних властивостей. Тобто, процесом зносу ковзних контактів міського електротранспорту можна керувати змінюючи технологічні особливості їх виготовлення.

3. Фізичні, електро- та триботехнічні властивості ковзних контактів будуть залежати від концентрації наповнювача і матеріалу матриці, а

закономірність зміни їх поперечного перерізу визначатиметься виразами, запропонованими в роботі. На основі вищезазначеного, запропоновано склади струмознімальних ковзних елементів міського електротранспорту, які забезпечують фізико-хімічну взаємодію композиційних матеріалів – матриці та наповнювача. Крім того, вперше запропоновано вирази для визначення величин зносу матриці та наповнювача, прирівнюючи які можна знайти відношення вмісту складових матеріалу ковзного контакту із забезпеченням високого рівня надійності експлуатації міського електротранспорту.

4. На основі марківської моделі зносу отримано закон розподілу ресурсу ковзних контактів міського електротранспорту. При цьому, характерним є те, що параметри розподілу мають конкретний фізичний зміст і є характеристиками процесів тертя і зношування, що відбуваються під дією механічної та електричної складових.

5. Стендові дослідження ковзних контактів реальних розмірів показали, що середній питомий знос запропонованих ковзних контактів менший за серійні в 1,7...2,1 раза. Під час взаємодії контактного проводу із запропонованими вставками його питомий знос нижче на 16,7...33,3 % порівняно з ковзним контактом із серійними вставками. Контактний електроопір ковзних контактів із запропонованими вставками № 1–2 порівняно з контактом із серійними вставками нижче в 1,3...1,9 раза. Коефіцієнт тертя ковзних контактів із запропонованими вставками в 1,2...2,5 раза менше порівняно з контактами із серійними вставками.

Фізичні властивості досліджуваних ковзних контактів наступні. Мікротвердість поверхневих шарів контактних проводів після взаємодії із запропонованими вставками на 12,5...16,6 % вища мікротвердість, при взаємодії із серійними вставками. Твердість запропонованих вставок № 1–2 на 9,3...21,4 % вища порівняно з твердістю серійних вставок. Аналогічна картина спостерігається і після їх взаємодії з контактними проводами. Температура рекристалізації контактних проводів після взаємодії із серійними вставками

складає близько 150...200°C; після взаємодії із запропонованими вставками № 1 – 190...200°C, а № 2 – 200...210°C. Характерним є те, що на робочій поверхні контактних проводів після взаємодії із запропонованими вставками № 1–2 не спостерігається відпалу цієї поверхні. Крім того, температура в зоні ковзного контакту практично не впливає на тимчасовий опір контактних проводів у процесі взаємодії із запропонованими вставками.

6. Експлуатаційні дослідження ковзних контактів міського електротранспорту показали, що середній питомий знос контактного проводу при взаємодії із запропонованими струмознімальними вставками знижується в 4...9 разів порівняно зі зносом контактних проводів, що взаємодіяли із серійними вставками. Крім того, середній знос контактного проводу на всіх трьох досліджуваних ділянках більш рівномірний, тобто при взаємодії із запропонованими вставками знижується спрацювання контактного проводу по всій довжині ділянки. Середній знос запропонованих вставок в 1,9...2,3 раза нижчий за знос серійних вставок міського електротранспорту. Перевагами запропонованих вставок № 1–2 є рівномірність розподілення зносу за робочою поверхнею.

Середньорічні питомі витрати вставок по Кременчуцькому тролейбусному депо в 2011-2012 рр. знизились у 2...4 рази при застосуванні запропонованих вставок, а термін служби контактних проводів при взаємодії із запропонованими вставками більше, ніж у 2 рази порівняно з терміном служби проводу при взаємодії із серійними вставками.

7. Техніко-економічна ефективність полягає у наступному: відбувається скорочення питомої втрати міді контактним проводом при експлуатації в парі із запропонованими вставками № 1 на 0,083 кг/10³км пробігу, а в парі із запропонованими вставками № 2 – на 0,115 кг/10³км пробігу. Залежно від пробігу міського електротранспорту економія міді при застосуванні запропонованих ковзних контактів складає до 0,1 т/рік, а зниження питомих експлуатаційних витрат складає до 25 грн/1000 км пробігу міського

електротранспорту. При заміні серійних вставок на запропоновані № 1–2 спостерігається майже однакове скорочення експлуатаційних витрат, а величина скорочень залежно від річного пробігу міського електротранспорту становить 250...1250 грн/млн км.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А.с. 342833 СССР. Способ получения углеграфитовых изделий / Сенин Н.Д., Смирнов Б.Н. и др. // Бюл. – 1972. – №20.
2. А.с. 368687 СССР. Щётка для электрической машины / Тенкин И.В., Давидович А.С. и др. // Бюл. – 1973. – №9.
3. А.с. 427433 СССР. Электрощёточный материал / Давидович Я.Г., Смелянский Б.М. и др. // Бюл. изобр. – 1974. – №17.
4. А.с. 843057 СССР. Щётка для электрической машины / Пшеничкин П.А. Степанов В.П. и др. // Бюл. изобр. – 1981. – №24.
5. А.с. 970525 СССР. Щётка для электрических машин / Пшеничкин П.А. Степанов В.П. и др. // Бюл. изобр. – 1982. – №40.
6. Аксенов А.Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях. М.: Машиностроение, 1977. – 152 с.
7. Алексеев Н.М., Богданов Р.И., Буше Н.А. и др. Новое о структурных особенностях трения твёрдых тел // Трение и износ. 1988. Т. 9, №6. С. 965-974.
8. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. – 280 с.
9. Алехин В.Я., Берент В.Я., Кирбаба В.А. Структура меди и свойства катанки, полученной на установке НЛП // Кабельная техника, 1975. – Вып. 10(128). – С. 11-13.
10. Афанасьев А.С. Контактные сети трамвая и троллейбуса. – М.: Транспорт, 1988. – 264 с.
11. Афанасьев А.С., Купцов Ю.Е. Контактные и кабельные сети трамвая и троллейбуса. – М.: Транспорт, 1970. – 256 с.
12. Ачкасов Л.Г., Берент В.Я., Буше Н.А. Механические свойства медных сплавов для контактных проводов // Вестник ЦНИИ железнодорожного транспорта. – 1969. – №4. – С. 10-14.
13. Баб'як М.О. Про деякі особливості розрахунку зносу контактних

пластин / М.О. Баб'як, М.Д. Грилицький // Вісник СНУ ім. В. Даля. – № 4(158). – Ч. 1. – 2011. – С. 232-236.

14. Барановський Д.М. Теоретичні передумови підвищення надійності системи "контактна підвіска – струмоприймач" зменшенням інтенсивності зношування її елементів після лазерного модифікування // Міжнародний науковий журнал "Проблеми трибології (Problems of Tribology)" / м. Хмельницький. – 2007. – №2. – С. 34-38.

15. Бартенъев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. Ленинград.: Химия. Ленинград. отделение, 1972. – 240 с.

16. Беляев И.А., Вологин А.В., Фрайфельд А.В. Совершенствование токоприёмников и контактных подвесок и методов расчета их взаимодействия для высоких скоростей движения.– Железные дороги мира.– №11.–1976–С.3-21.

17. Беляев И.А., Вологин В.А. Взаимодействие токоприёмников и контактной сети. – М.: Транспорт, 1983. – 191 с.

18. Беляев И.А., Михеев В.П., Шиян В.А. Токосъём и токоприёмники электроподвижного состава. – М.: Транспорт, 1976. – 184 с.

19. Бельдей В.В., Берент В.Я. Токосъёмные материалы для электроподвижного состава // Железнодорожный транспорт, 1981. – №1. – С. 45-48.

20. Берент В.Я., Круминя М.Ю., Щерба Ю.Н., Бельдей В.В. Новый токосъёмный материал для скользящего контакта электрического транспорта // Вестник машиностроения, 1981. – №12. – С. 15-18.

21. Берент В.Я. Влияние эксплуатационных факторов на электроконтактные характеристики токосъёмного узла. Вестник ВНИИЖТ, 1995. – №4 – С. 35-39.

22. Берент В.Я. и др. Термические и физико-химические процессы трения и износа электрических силовых скользящих контактов // Schmierungstechnik, Berlin, 1981. – Т. 12. – №10. – С. 299-301.

23. Берент В.Я. Изучение причин повреждений проводов электрофицированного транспорта // ЦНИИТЭИ МПС, Экспрессинформация. Железнодорожный транспорт за рубежом. М., 1980. – Сер.Ш.– Вып. 6.–

С. 19-26.

24. Берент В.Я. Медные легированные контактные провода // Железные дороги мира. – 2002. – № 4. – С. 46-52.

25. Берент В.Я. Перспективы улучшения работы сильноточного скользящего контакта «контактный провод – токосъёмный элемент полоза токоприёмника» // Железные дороги мира. – 2002. – № 10. – С. 46-50.

26. Берент В.Я. Порцелан А.А. Исследование прочностных и структурных изменений контактных проводов в эксплуатации // Труды ЦНИИ МПС., изд-во Транспорт, 1968. – Вып. 337. – С. 69-76.

27. Берент В.Я. Процессы взаимодействия токосъёмных элементов электроподвижного состава и контактного провода, материалы и прогрессивные технологии их изготовления: Автореф. дис... д-ра техн. наук. – М., 1996. – 45 с.

28. Берент В.Я. Свойства токосъёмных элементов ползозов токоприёмников электроподвижного состава и области их рационального использования // Технология. – 1998. – № 3 – 4. – С. 32-41.

29. Берент В.Я., Буше Н.А., Сегал И.Я. Классификация дефектов и повреждений контактных проводов электрофицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1974. – 80 с.

30. Берент В.Я., Гершман И.С. Вторичные структуры на поверхностях сильноточных скользящих контактов. 1. Строение и состав // Трение и износ. 1989. – Т. 10. – №4. – С. 687-692.

31. Берент В.Я., Гершман И.С., Зайчиков А.В., Бельдей В.В. Состав и строение поверхностных слоев контактных проводов, работавших в паре с различными токосъёмными элементами // Вестник ВНИИЖТ, 1985. – №3. – С. 28-31.

32. Берент В.Я., Красиков К.И., Строк Л.П. Изыскание материала для электрического скользящего контакта // Вестник ВНИИЖТ.– 981. – №1. –С. 7-8.

33. Берент В.Я., Порцелан А.А., Виккер И.В. Температура разупрочнения медных и бронзовых контактных проводов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1966. – №2. – С. 24-29.

34. Берент В.Я., Рачек Л.Н. Электроконтактные характеристики сильнотокового контакта «токосъемные элементы полоза токоприемника — контактный провод» // Вестник ВНИИЖТ. — 1992. — № 6. — С. 36-41.

35. Берент В.Я., Рачек Л.Н. Электроконтактные характеристики сильнотокового контакта, токосъемные элементы полоза токоприемника — контактный провод. Вестник ВНИИЖТ. — №6. — 1992. — С. 36-41.

36. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учеб. Для ВУЗов / Под ред. Д.Г. Громаковского — Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. — 268 с.

37. Бершадский Л.И. Критерии трибологической совместимости конструкционных и смазочных материалов. — Киев: Знание, 1988. — 16 с.

38. Блау П.Д. Модель приработки и других переходных процессов в трении скольжения // Проблемы трения и смазки. Труды американского общества инженеров-механиков. — 1988. — №2. — С. 108-116.

39. Большаков Ю.Л. К вопросу о токосъеме и износе контактного провода / Ю.Л. Большаков, И.С. Гершман // Залізничний транспорт України. — 2008. — № 1. — С. 55-56.

40. Большаков Ю.Л. Совместимость различных токосъемных материалов на одном участке контактного провода / Ю.Л. Большаков, И.С. Гершман // Залізничний транспорт України. — 2008. — № 5. — С. 55-56.

41. Борц Ю.В., Чекулаев В.Е. Контактная сеть. — М.: Транспорт, 1976. — 160 с.

42. Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка. — М.: Машгиз, 1960.—542 с.

43. Буше Н.А. Роль необратимых процессов в совместимости трибосистем // Железные дороги мира. — 2003. — № 2. — С. 38-41.

44. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. — М.: Транспорт, 1987. — 223 с.

45. Буше Н.А., Берент В.Я. Особенности схватывания медных электропроводных сплавов // Вестник ЦНИИ железнодорожного транспорта, 1967. — № 8. — С. 36-38.

46. Буше Н.А., Берент В.Я., Порцелан А.А. Воздействие токосъемных

материалов на разупрочнение контактных проводов в эксплуатации // Труды ЦНИИ МПС, М.: Транспорт, 1972. – Вып. 473. – С. 81-88.

47. Буше Н.А., Крупникова-Перлина Е.И., Берент В.Я. Влияние технологических факторов на текстуру медных контактных проводов // Металловедение и термическая обработка металлов, 1975. – №1. – С. 39-42.

48. Быстров В.Н. Избирательный перенос при трении – новые возможности при изготовлении и использовании машин / Эффект безызносности в триботехнологии. – № 1. – 1992. – С. 17-33.

49. Василевский А.С., Мултановский В.В. Статистическая физика и термодинамика. – М., 1985. – 243с.

50. Васильев Б.В. Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств. – М.: Совет. Радио, 1970. – 336 с.

51. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. – 225 с.

52. Ветров Н.И. Справочник электромеханика контактной сети. – М.: Транспорт, 1967. – 240 с.

53. Ветров Н.И., Типицын М.Ф. Справочник по эксплуатации, ремонту и монтажу контактной сети. – М.: Транспорт, 1977. – 128 с.

54. Височин Б.О. Электроматериаловедение. – К., 1971. – 164 с.

55. Власов И.И. Совершенствование контактной сети и токосъёма на электрифицированных железных дорогах / Труды ВНИИЖТ. – Вып.337. – М.: Транспорт, 1968. – 174 с.

56. Гаркунов Д.Н. Триботехника (пособие для конструктора). – М.: Машиностроение, 1999.– 336 с.

57. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность. – М.: Машиностроение, 2001. – 616 с.

58. Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: Машиностроение, 1989. – 327 с.

59. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А. Избирательный перенос в узлах трения. – М.: Транспорт, 1979. – 240 с.

60. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. – М.: Советское радио, 1966. – 166 с.

61. Гершман И. С. Токосъемные углеродно-медные материалы // Вестник ВНИИЖТ. – 2002. – № 5. – С. 15-20.
62. Гершман И. С., Буше Н. А. Неустойчивость системы с токосъемом в процессе самоорганизации // Трение и износ. – Т. 20.– 1999. – № 6. – С. 623-629.
63. Гершман И.С., Буше Н.А. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах // Трение и износ. – Т. 16. – 1995. – № 1. – С. 61-70.
64. Гершман И. С., Трушевский С. М., Шумицкий А. В. Роль углерода в самоорганизации процесса изнашивания сильноточных скользящих электрических контактов // Трение и износ. – Т. 23. – 2002. – № 5. – С. 520-523.
65. Гершман И.С. Совместимость материалов при трении с токосъёмом// Трение и износ. – 2000. – Т.21. – №5. – С. 540-543.
66. Гершман И.С. Токосъемные углеродно-медные материалы // Вестник ВНИИЖТ. – 2002. – № 5. – С. 15-20.
67. Гершман И.С., Бучнев Л.М. Токосъемные углеродные материалы нового поколения // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 6. – С. 36 – 41.
68. Гоголев А.Л., Бутенко В.И., Чистяков А.В. Об одной универсальной характеристике структуры поверхностного слоя деталей // Изв. высш. учеб. завед. Сев.-Ковч. регион. Техн. науки, 1994. – №3-4. – С.146-151.
69. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1979. – 568 с.
70. Горошков Ю.И., Бондарев Н.А. Контактная сеть. – М.: Транспорт, 1973. – 384 с.
71. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Механизм формирования шероховатости в процессе приработки // Трение и износ. – 1982. – т.3. – №4. – С. 632-642.
72. ГОСТ 14692 – 78 «Вставки угольные контактные для токоприемников электроподвижного состава». – М.: Госкомитет СССР по стандартам.
73. Громаковский Д.Г. Система понятий и структура моделей изнашивания // Трение и износ. – 1997. – Т. 18. – №1. – С. 381-393.

74. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1978. – 647 с.
75. Де Гроот С., Мазур Н. Неравновесная термодинамика. М., 1964. – 258с.
76. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1995. – 92 с.
77. ДСТУ 3433-96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. – К.: Держстандарт України, 1998. – 41 с.
78. Евдошмов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ эксперимента при решении задач трения и износа. – М.: Наука, 1980. – 228 с.
79. Захаров С.А. Анализ и оценка мероприятий повышения эффективности и безопасности работы троллейбуса в зимний сезон 1999-2000 гг. // Вестник ГЭТ России. – 2000. – № 3. – С. 9-13.
80. Ивин К.В. Токосъем городского наземного транспорта. – М., 1965. – 262 с.
81. К вопросу выбора рациональной формы профиля контактных вставок токоприемников электроподвижного состава / Ю.Л. Большаков, И.С. Гершман, В.Г. Сыченко, С.М. Жуковин // Залізничний транспорт України. – 2007. – № 3. – С. 53-55.
82. Коваль В. А. Особливості виготовлення ковзних контактів міського електротранспорту [Текст] / В. А. Коваль, П. М. Алтухов // Науковий вісник КУЕІТУ «Нові технології». – № 3(33). – 2011. – С. 104–108.
83. Коваль В. А. Забезпечення надійності ковзних контактів міського електротранспорту у процесі експлуатації [Текст] / В. А. Коваль, П. М. Алтухов // Науковий вісник КУЕІТУ «Нові технології». – № 4(34). – 2011. – С. 96-100.
84. Коваль В. А. Математична модель для визначення складу композиційного матеріалу ковзного контакту міського електротранспорту [Текст] // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Вип.6 (177).–Ч1. – 2012. – С. 139–144.

85. Коваль В. А. Аналіз умов експлуатації ковзних контактів міського електротранспорту для забезпечення їх надійності [Текст] // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2012. – № 132. – С. 160–166.

86. Коваль В.А. Побудова моделі розподілу ресурсу ковзних контактів міського електротранспорту [Текст] // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2012. – № 42. – С. 28–32.

87. Коваль В. А. Підвищення надійності і ефективності експлуатації міського електротранспорту [Текст] / В. А. Коваль, П. М. Алтухов // Тези Всеукраїнської конференції молодих вчених, аспірантів, студентів «Транзитна територія». – Кременчук : КУЕІТУ. – 2011. – С. 15.

88. Коваль В. А. Математична модель для визначення складу композиційного матеріалу ковзного контакту міського електротранспорту [Текст] // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики», м. Євпаторія, 3-8 травня 2012 року. – 2012. – С. 63–64.

89. Киреенко О.Ф. Структурно–масштабная модель безызносности при трении металлических поверхностей // Физика дефектов поверхностных слоев материалов. – Л.: Физ.-техн. ин-т, 1989. – С. 82-88.

90. Колесов С.М. Матеріали та взаємодія контактної підвіски і струмоприймача / С.М. Колесов, І.С. Колесов. – Д.: Вид-во: Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. ак. В. Лазаряна, 2006. – 284 с.

91. Контактные подвески и токоприемники для высокоскоростных линий // Железные дороги мира. – 2000. – № 7. – С. 37-40.

92. Костецкий Б.И. и др. Механико-химические процессы при граничном трении. – М.: Наука, 1972. – 170 с.

93. Костецкий Б.И. Качество поверхности и трение в машинах / Б.И. Костецкий, Н.В. Колениченко. – К.: Техніка, 1969. – 215 с.

94. Костецкий Б.И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания // Трение и износ. –

1980. – Т. 1. – №4. – С. 622-637.

95. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Бершадский Л.И. Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев: Техника, 1976. – 256 с.

96. Кравец И.А., Ремонтная регенерация трибосистем. – Т.: Изд-во Бережанского агротехн. ин-та, 2003. – 284 с.

97. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

98. Крагельский И.В., Добычин Н.М., Камбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

99. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

100. Криштал М.А., Филяев В.И. Диффузия примесных атомов в области дислокаций в металлах // Физика и химия обработки материалов. – 1979. – №1. – С. 115-126.

101. Кужаров А.С. Координационная трибохимия избирательного переноса: Дис. ... д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону: РИИСХ, 1991. – 513 с.

102. Кузнецов С.М., Малозёмов Б.В. Анализ надежности технических устройств // Сборник научных трудов "Совершенствование технических средств электрического транспорта". – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – С. 36-42.

103. Кузьменко А.Г. Методи розрахунків і випробувань на зношування та надійність: Навчальний посібник. – Хмельницький: ТУП, 2002. – 151 с.

104. Кулу П. Износостойкость порошковых материалов и покрытий. – Таллин: Валгус, 1988. – 120 с.

105. Кумезава И. Контактная подвеска при высоких скоростях движения на электрических железных дорогах / Ежемесячный бюллетень Международной ассоциации железнодорожных конгрессов. – №1 – 1962. – С. 15-23.

106. Купцов Ю.Е. Исследование некоторых физико-технических характеристик и служебных свойств угольных вставок // Труды ЦНИИ МПС. – Вып.233. – М.: Трансжелдориздат, 1962. – С.112-121.

107. Купцов Ю.Е. Опыт применения угольных вставок пантографов. – М.: Транспорт, 1966. – 154 с.
108. Купцов Ю.Е. Применение угольных вставок на токоприёмниках электроподвижного состава // Труды ЦНИИ МПС. – Вып.337. – М.: Транспорт, 1968. – С. 34-42.
109. Купцов Ю.Е. Увеличение срока службы контактного провода. – М.: Транспорт, 1972. – 124 с.
110. Либенсон Г.А. Производство спеченных изделий. – М.: Metallургия, 1982. – 256 с.
111. Лившиц П.С. Скользящий контакт электрических машин. – М., Энергия, 1974. – 228 с.
112. Литвинов В.Н., Михин Н.М., Мышкин Н.К. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении. – М.: Наука, 1979. – 187 с.
113. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. М.: Metallургия, 1976. – 176 с.
114. Максимов А.Н. Городской электротранспорт: Троллейбус. – М.: Академия, 2004. – 256 с.
115. Малозёмов Б.В. Анализ и повышение надёжности транспортных средств электрического транспорта // Вестник Красноярского государственного технического университета. Красноярск: Изд-во ИПЦ КГТУ, Транспорт, 2004. – Вып. 34. – С. 206-217.
116. Марквардт К.Г., Власов И.И. Контактная сеть. 3-е изд. – М.: транспорт, 1977. – 272 с.
117. Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. – М.: Наука, 1979. – 118 с.
118. Машков Ю.К. Трибология конструкционных материалов. Омск: ОмГТУ, 1996. – 299 с.
119. Миронюк Г.И., Терновая Т.В., Карнаухов И.Н. Математическое моделирование кинетики процессов безызносного трения // Мат. методи і фіз.-мех. поля. – 1995. – Вып. 38. – С. 105-108.
120. Михеев В.П., Агеева И.А., Сдвижков Н.С. Уменьшение износа

контактного провода. – М.: Транспорт, 1964. – 223 с.

121. Мямлін С. В. Підвищення надійності ковзних контактів міського електротранспорту розробкою нових матеріалів [Текст] / С. В. Мямлін, В. А. Коваль // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. – № 28. – 2011. – С. 190–196.

122. Новицкий В.П., Зограф И.А. Оценки погрешностей результатов измерений. – Л.: ЭнергATOMиздат. – 1985. – 248 с.

123. Обеспечение надежности работы токоприёмников и контактной сети / Межвуз. темат. сб. научн. тр. – Омск: ОмИИТ, 1984. – 111 с.

124. Основы трибологии / Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Наука и техника, 1995. – 774 с.

125. Патент України 19814. Спосіб струмознімання / Счастливий Г.Г., Меженый Ю.Я. та ін. // Бюл. – 1997. – №6.

126. Патент України 21106. Щітка для електричних машин / Завгородня Т.І., Лошак О.С. // Бюл. – 1998. – №1.

127. Патент України №48851А. Струмознімальний ковзний елемент // Ю.Л. Большаков, М.Ю. Большаков, С.М. Бондаренко. – 2002. – Бюл. №8.

128. Патент Германии DE № 4441339, B60L5/00, опубл. 09.05.1996.

129. Патент Германии DE № 4024021, C04B35/54, опубл. 30.01.1992.

130. Патент РФ № 2130390 МКИ B60L5/08, опубл. 20.05.1999, «Контактная вставка токосъемников троллейбусов и токопроводящий композиционный материал для ее изготовления»

131. Патент України №9293. Струмознімальний ковзний елемент // В.В. Аулін, Д.М. Барановський, В.М. Бобрицький та ін. – 2005. – Бюл. №9.

132. Патент України №76816. Струмознімний ковзний елемент / Сергієнко С. А., Коваль В. А. // Бюл. – 2013. – №1.

133. Патент України №76551. Струмознімний ковзний елемент / Сергієнко С. А., Коваль В. А. // Бюл. – 2013. – №2.

134. Правила эксплуатации трамвая и троллейбуса: Нормативно-производственное издание. – К.: 1997. – 95 с.

135. Приймаков О.Г. Витривалість кольорових сплавів та її

експериментальне дослідження / О.Г. Приймаков, О.В.Бобровицький, Г.О. Приймаков // Открытые информационные и компьютерные технологи. – Х.: НАКУ «ХАІ», 2003. – Вып. 16. – С. 117-123.

136. Пронилов А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. – 591 с.

137. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.

138. Саркисян С.А. Теория прогнозирования и принятия решений. – М.: Высш. шк., 1977. – 488 с.

139. Сергієнко С. А. Математична модель зміни геометрії ковзних контактів міського електротранспорту [Текст] / С. А. Сергієнко, В. А. Коваль // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Вып. 1(72). – 2012. – С. 83–86.

140. Сергиенко С. А. Анализ путей повышения эффективности эксплуатации городского электротранспорта [Текст] / С. А. Сергієнко, В. А. Коваль // Матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів 28–29 березня 2012 року «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації». – Кременчук : КрНУ, 2012. – С. 345.

141. Сегал И.Я., Порцелан А.А. Оценка повреждаемости контактных проводов в условиях эксплуатации // Труды ЦНИИ МПС, М., изд-во Транспорт, 1972. – Вып. 473. – С. 64-71.

142. Справочник по триботехники: В 3 т. Т.1: Теоретические основы / Под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1990. – 416с.

143. Страхов А.А. Вопросы технико-экономического обоснования системы продления срока эксплуатации подвижного состава городского транспорта // Вестник ГЭТ России. 2001. – № 3. – С. 24-25.

144. Тимошенко С.П. Курс теории упругости.– К.: Наукова думка, 1972.– 578 с.

145. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; под ред. Д.Г.Громаковского. –

Самара, 2000. – 268 с.

146. Триботехнология: Словарь-справочник / С.Н.Соловьев, Л.П.Клименко, С.Ж.Боду, Е.В.Трофимова; под общ. ред. С.Н.Соловьева. – Николаев: Изд-во НГГУ им. П.Могилы, 2003. – 384 с.

147. Трофимов А.Н. Контактные вставки токосъемников троллейбусов. – М., 1966. – 314 с.

148. Удлинение срока службы контактного провода // Под общ. ред. Беяева И.Л. – М.: Трансжелдориздат, 1958. – 80 с.

149. Фиалков А. С. Углеграфитовые материалы. М.: Энергия, 1979. – 167с.

150. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении / В.Н. Литвинов, Н.М. Михин, Н.К. Мышкин: Отв. ред. д-р техн. наук, проф. Н.В. Демкин. – М.: Наука, 1979. – 184 с.

151. Физическая мезомеханика и компьютерное моделирование материалов. Под ред. В.Е. Панина, – Новосибирск: Наука, 1995. Т 1. – 298 с. Т 2. – 320 с.

152. Фрайфельд А.В., Бондарев Н.А. Марков А.С. Устройство, сооружение и эксплуатация контактной сети и воздушных линий. – М.: Транспорт, 1986. – 336 с.

153. Хайнике Г. Трибохимия. – М.: Мир, 1987. – 584 с.

154. Ханин М.В. Механическое изнашивание материалов. М.: Изд. стандартов, 1984. – 152 с.

155. Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Физика, химия и механика поверхности твердого тела. – Луганск: ВУГУ, 2000. – 624 с.

156. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.

157. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностр. литературы, 1961. – 298с.

158. Хорошилов В.П., Емец В.И. Обеспечение долговечности и безопасности эксплуатации электрооборудования троллейбусов // Вестник ГЭТ России. – 2000. – №6. – С. 24-25.

159. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. М.: Изд. АН СССР, 1960. – 351 с.

160. Хрущев М.М., Беркович Е.С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз. М., Издательство АН СССР, 1959. – 136 с.

161. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. М.: Машиностроение, 1979. – 263 с.

162. Чистяков А.В. Влияние физико-механического и структурного состояния поверхностного слоя деталей на их износостойкость // Новочерк.политех.ин-т. – Новочеркасск, 1987. – 16 с. / Деп. в ВНИИТЭМР 28.04.87, №206. – 8723.

163. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Гинсбург А.Г., Игнатъева З.В. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар. М.: Наука, 1979. – 267 с.

164. Шиллинг А., Солондз Д., Камогф С. Электроно-микроскопические исследование дислокационной структуры поверхностной зоны металлов при трении скольжения // Теория и прикладные задачи трения, износа и смазки машин: Сб.статей. – М.: Наука, 1982. – С. 128-136.

165. Яковлев Д.В., Сидоров Н.И. Устройство, ремонт и эксплуатация электровозов переменного тока. – М.: Высшая школа, 1972. – 368 с.

166. Allemand P.M., Khemani K.C., Koch A. etal // Science. 1991. Vol. 253. – P. 301.

167. Aoki S., Fukuhara K. Effect of Material Combination of Metallic Contact Strip and Contact Wire on Wear Characteristics // Quarterly Report of RTRI. – Vol. 38. – № 2. – Jun. 1997. – P. 82-88.

168. Babich M. Approach to the measurement of tribological characteristics of contact layer triboelements // Eurotrib–89. Proc. 5–th int. congress on tribology. – Helsinki, Finland. – 1989. –№1. – P. 17.

169. Earles S.W.E. Hayler M.G., Powell D.G. A comparison of surface theories and experimental results for high speed dry friction. – ASLE Trans., 1971. – V.14, pt.2. – P. 135-143.

170. Fleischer G., Groges H., Thum H. Verschleiss und zukerlassigkit veb. – Berlin: Verlag Technik, 1980. – 244 p.

171. Georges J.M. Some surface science aspects of tribology // *New Directions in Tribology* / Ed. by I. M. Hutchings – Bury, St. Edmunds and London. MEP. – 1997. – P. 67-82.

172. H. Nagasawa et al. Quarterly Report of RTRI, 1998. – N 3. – P. 142-146.

173. Hebard A.F., Rosseinsky M.J., Haddon R.C. et al // *Ibid.* 1991. – Vol. 350. – 600 p.

174. Jahanmir S., and Beltzer M. “Effect of Additive Molecular Structure on Friction Coefficient and Adsorption”. *Journal of Tribology.* – Vol.108. – №1. – 1986. – P. 109-116.

175. Kirk I.A., Swanson T.D. Subsurface effects during sliding wear // *Wear.* – 1975. – V. 35. – №1. – P. 63-67.

176. Klamecki B. E. Energy Dissipation in Sliding // *Wear* 77 (1982). – № 2. – P. 115-128.

177. Klamecki B.E. An entropy-based model of plastic deformation energy dissipation in sliding // *Wear.* –1984.– Vol. 96, №3. – P. 319-329.

178. Kratschmer W., Lamb L.D., Fostiropoulos K., Hoffman D.R.II *Ibid.* 1990. – Vol. 347. – 354 p.

179. Kubo S., Tsuchiya H., Ikeuchi J. Wear Properties of Metal / Carbon Composite Pantograph Sliders for Conventional Electric Vehicles // *Quarterly Report of RTRI.* – Vol. 38. – № 1. – Mar. 1997. – P. 25-30.

180. Osawa E., Yoshida M., Fujita M. // *MRS Bull.* – 1994. – Vol. 19. – №11. – 33 p.

181. Praca naukowo_badawcza. Laboratoryjne i eksploatacyjne badania teflonowego SLIDER 2000. WSI w Radomiu. – Radom. – 1993. – 36 p.

182. Rao C.N.R., Ram Seshadri // *MRS Bull.* – 1994. – Vol. 19.– №11. – 28 p.

183. Sheasby J.S., Caughlin T.A., Blahey A.G., Laycock K.F. “A reciprocating wear test for evaluating boundary lubrication”. *Tribology International*, Vol. 23. – 1990. – P. 301-308.

184. Spalvins T., and Buzek B. “Frictional and Morphological Characteristics of Ion-plated Soft Metallic Films”. *Thin Solid Films*, Vol.84. – №3. - 1981. – 266 p.

185. Suh Y.M., Iang S.I., Zheng L.Q. A kinetic study of interface reactions

for an organic molybdenum compound as a lubricant additive // Tribology international. – 1990. – Vol. 23. – № 6. – P. 438-442.

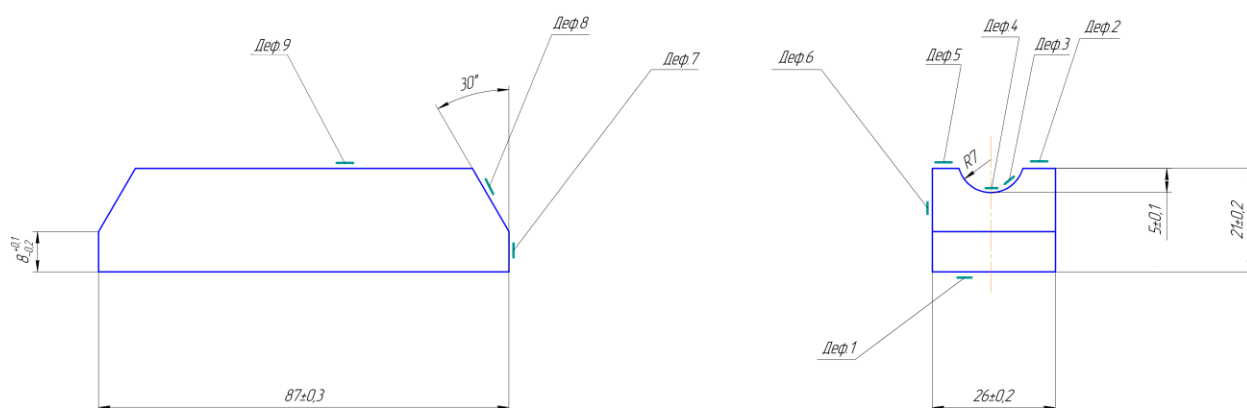
186. Teer D. Ion Plating. – Tribology, 1975. – V.8. – P. 247-252.

187. Watanabe Y., Takagi R. Study of the Copper Oxide Films Between Sliding Contacts. – 1981. – № 56. – P. 249-256.

188. Wunsch F. Relationship between the chemical structure of a lubricant and fretting. – Tribology International, 1977. – V. 10. – №3. – P. 147-151.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А



Найменування дефекта	Коефіцієнт повтєвності дефектів		Основний спосіб усунення дефекта	Допустимий спосіб усунення дефекта
	від загальної кількості деталей що надійшли на дефектацію	від загальної кількості ремонтотриманих деталей		
1 Підпали вставки, каверни глибиною більше 1,5 мм	0,89	0,78	Зачистити шліфувальним кругом	Обробити напильником
2 Тріщини поверхні вставки довжиною більше 5,0 мм	0,91	0,82	Засверлити тріщини з обох кінців	Тех
3 Каверни на поверхні глибиною більше 10 мм	0,65	0,54	Зачистити шліфувальним кругом	Тех
4 Знос поверхні вставки під контактний провід до розміру по висоті менше 8,0 мм	0,96	0,96	Замінити вставку новою	Замінити вставку менш зношеною
5 Сколювання бічної поверхні вставки під контактний провід під кутом більше 15°	0,38	0,19	Запилити поверхню вставки	Обробити напильником
6 Тріщини поверхні довжиною більше 7 мм	0,15	0,10	Засверлити тріщину з обох кінців	Тех
7 Підпали поверхні з утворенням каверн глибиною більше 2 мм	0,75	0,78	Зачистити поверхню шліфувальним кругом	Обробити напильником
8 Сколювання поверхні під кутом більше 10°	0,68	0,68	Запилити поверхню вставки	Обробити напильником
9 Знос поверхні під контактний провід товщиною більше 5 мм	0,58	0,66	Замінити вставку новою	Замінити вставку менш зношеною

Рис. А.1. Технологічний маршрут ремонту вставки

Маршрутна карта усунення дефектів вугільної вставки

№ дефекту	Найменування дефекту	Номер маршруту та сполучення дефектів		
		I	II	III
1	Знос поверхні вставки під контактний провід до розміру по висоті менше 8,0 мм	+	+	+
2	Сколювання бічної поверхні вставки під контактний провід під кутом більше 15°	-	+	+
3	Тріщини вставки довжиною більше 5,0 мм	+	+	+
4	Підпали вставки	-	+	+

Експлуатаційні характеристики вставок ВКТ-М при роботі у парі з мідним проводом МФ-100

Показник	Стан ковзного контакту		
	Сухий	Вологий	Мокрий*
Лінійний знос проводу, мкм/10000 проходів	0,00	0,20... 0,25	0,25... 0,30
Площа зносу проводу в перерізі, мм ² /10000 проходів**	0,00	0,003... 0,004	0,004... 0,005
Коефіцієнт тертя	0,13	0,05...0,06	
Спад наруги у контакті, В	0,40...0,60	0,25...0,40	
Лінійний знос вставок, мм/100 км пробігу	+(0,1...0,2) -(0,05... 0,1)	+(0,2... 0,4)	-(0,04... 0,06)

* - за умови проливної дощу;

** - згідно ГОСТ 2584-86 площа зносу менше 0,3 мм²/10000 проходів.

Основні властивості вставок на основі вуглецю

Характеристики матеріалів на основі вуглецю			Властивості матеріалів на основі вуглецю			
Матеріал	Країна	Основа	Густина, 10^3 , кг/м ³	Твер- дість, НС	Питомий електроопір, 10^{-6} , Ом·м	Метал, %
СУ3ТА	Англія	Кокс	1,75	90	40	0
МУ7D	»	»	2,5	90	8	35(Cu+Pb)
МУ7D	»	»	2,8	85	3,5	40(Cu+Pb)
МУ7D	»	»	3,2	80	1,4	50(Cu+Pb)
RH83M2	Німеччина	»	2,6	80	8	35Cu
SK85M	Австрія	»	2,15	78	10,5	20Cu
Вугільні	Японія	»	1,7	75	35	0
BH424D	Німеччина	»	2,6	80	8,5	35Cu
BH424C	»	Графіт штучний	2,5	45	7,5	35Cu
HC41	Японія	Кокс	3,3		6,4	> 40Cu
PCS72	»	»	2,5		8,5	30Cu
PCS401	»	»	4,3		0,9	30Cu+40 Сталь
SX801	»	»	2,9		3,0	(35 – 40) Cu
«А»	»	»	3,5	95	3,1	> 40Cu
«В»	»	»	3,0	85	2,7	45Cu
«С»	»	»	3,7	70	1,8	55Cu

Обладнання для виготовлення ковзних контактів

Технологія виготовлення струмознімальних вставок передбачала подрібнення складових компонентів до необхідної дисперсності за допомогою роторної дробилки (рис. Б.1), у якій подрібнення здійснюється робочими органами, що закріплені на роторі. Подрібнення здійснюється до тих пір, доки порошок не потрапляє до нижньої камери через встановлену колосникову решітку. Корпус з середини футерований зносостійким металом.



Рисунок Б.1 – Загальний вигляд дробилки

Потім отриманий порошок необхідно розділити на фракції. Це здійснюється за допомогою сепаратора, який дає змогу розділити складові компоненти на потрібні фракції. Принцип роботи сепаратора оснований на проходженні мілкої фракції крізь профільований диск під дією тиску повітря та відцентрової сили. Подача порошку здійснюється через штуцер разом із повітрям. Ротор обертається та виникає відцентрова сила, яка впливає на фракції меншого розміру, за рахунок цього вони проходять крізь профільований диск і потрапляють в отвір виводу найменших фракцій

порошку, при цьому найбільші фракційні порошки залишаються на дні корпусу.

Наступною технологічною операцією є змішування складових компонентів матеріалу струмознімальних елементів, яке проводиться у змішувальних барабанах (рис. Б.2).



Рисунок Б.2 – Загальний вигляд змішувального барабану з компонентами

Далі, отриману суміш необхідно просіяти, а потім пресувати у прес-формах (рис. Б.3) при тиску 150-400 МПа.

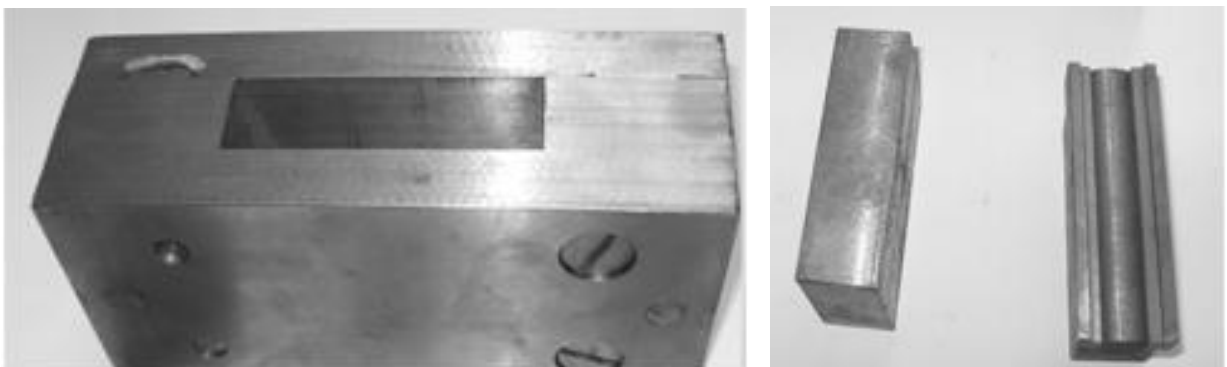


Рисунок Б.3 – Загальний вигляд прес-форми

Пресування вставок здійснювали на гідравлічному пресі (рис. Б.4) із зусиллям 1500 кг/см².



Рисунок Б.4 – Прес гідравлічний

Отримані заготовки відпалювали в електричних печах. Після чого спечені вставки піддавали механічній обробці. Потім здійснювали контроль геометричних розмірів.

Спикання натурних вставок міського електротранспорту проводилось у вакуумній електропечі (рис. Б.5) при температурі 170...200°C.



Рисунок Б.5 – Загальний вигляд печі

Конструкція та принцип роботи печі.

Піч вакуумна складається з двох блоків: печі I та шафи керування II (ДПЗН 07155.006.000).

В зварному корпусі печі на опорних фланцях розміщені дві самостійні сушильні камери 3.

Камера являє собою металевий циліндр 4, ізолюваний азбестовим картоном та обвитий ніхромовою проволокою 5, на поверхню якої нанесено шар шамоти та шар мінеральної вати. Крім цього для покращення теплоізоляції передбачені екрануючі прокладки з азбестового картону з алюмінієвою фольгою. Поверхня камери огорожена знімним металевим кожухом 7. Зверху камера закривається кришкою 8 з ущільнювачем 9. Ущільнювач охолоджується проточною водою. В кришці передбачений клапан II для зриву вакууму в камері.

В днищі камери встановлена термопара 12 для вимірювання і регулювання температури і патрубків 13 для підключення до вакуумного насосу.

Для обслуговування термопар і місць приєднання камер до вакуумного насосу на передньому боці печі знаходяться дві знімних панелі 16.

Шафа керування являє собою зварний каркас, в середині якого встановлені: вакуумний насос 17 з електродвигуном, ресивер 18 та панель електрична 19 з пусковою апаратурою.

Для зручності обслуговування шафа обладнана двома дверима.

На передній верхній панелі шафи знаходяться два мановакууметра 20. На верхніх дверцятах розміщено: два мілівольтметра 21, два перемикача 22 режимів роботи камер, лампа 23, сигналізує про наявність напруги, два перемикача 24 для ввімкнення нагріву камер, перемикач 25 для пуску вакуумного насосу, лампи 26, сигналізуючи про роботу насоса та камер.

Датчики мілівольтметрів налаштовані на режим роботи відповідної камери.

На нахиленій панелі шафи розміщені два вакуумних вентиля 27, які дозволяють приєднувати вакуумний насос до будь-якої камери.

В повітряній з'єднувальній арматурі шафи передбачені заглушки 28, які дозволяють (при необхідності) підключити камери до системи сухого повітря чи балону з інертним газом. В нижній частині шафи на задній стінці, розташовано відсік 29 для зберігання інструменту.

Автомати 31 та 32 для ввімкнення вакуумної печі розташовані на боковій стінці шафи.

Для вимірювання і регулювання температури в камерах печі служать мілівольтметри P1 і P2 з термопарами B1 і B2.

У залежності від режиму роботи: регенерації чи зберігання на мілівольтметрах встановлюється необхідна температура.

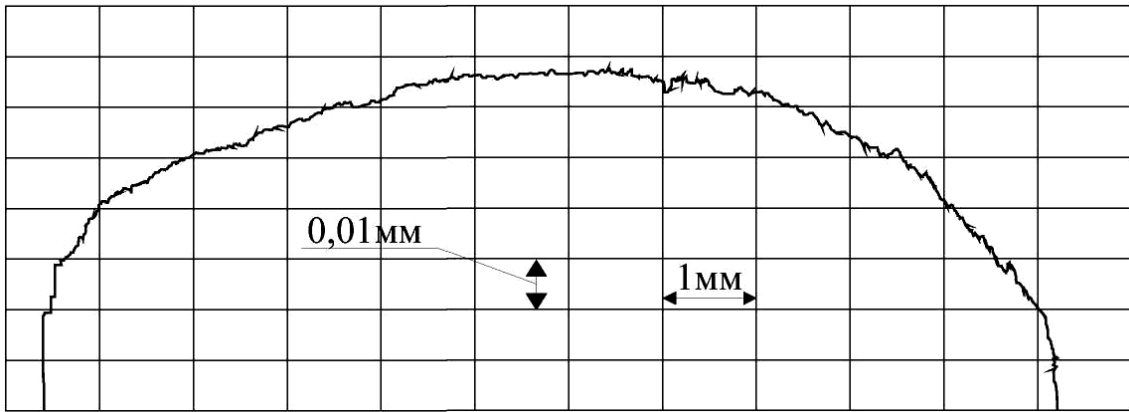
Увімкненням автомата F1 подається напруга в силові ланцюги, автоматом F2 – у ланцюги керування.

Про наявність напруги сигналізує лампа НЧ. Ввімкненням перемикачів S1 і S2 вмикаються пускачі K1 і K2, які вмикають відповідно електронагрівачі E1 і E2.

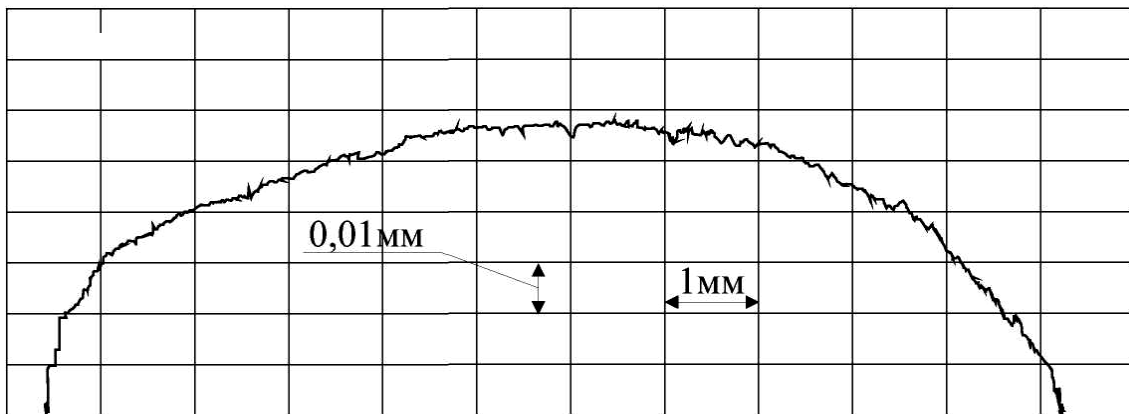
Про ввімкнення електронагрівачів сигнализують лампи Н1 і Н2. При підвищенні заданої температури в одній з камер вище норми, контакт вихідного реле розмикається і електронагрівач вимикається. При пониженні температури нижче заданої електронагрівач знову вмикається.

Ввімкнення і вимкнення електродвигуна М вакуумного насоса здійснюється перемикачем S3. Про ввімкнення електродвигуна символізує лампа Н3.

ДОДАТОК В



а



б

Рисунок В.1 – Профілограми робочих поверхонь контактної провід МФ-100 при взаємодії з: а – із серійними вставками; б – із запропонованими вставками

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор Кременчуцького
національного університету
імені Михайла Остроградського,

к.т.н., професор

В.В. Костін

7.10. вересня 2012 року



АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів досліджень Ковалю Віталія Анатолійовича за темою дисертаційної роботи "Підвищення надійності експлуатації ковзних електричних контактів міського електротранспорту".

В основі дисертаційної роботи Ковалю Віталія Анатолійовича лежать результати, отримані їм при виконанні теоретичних та експлуатаційних досліджень щодо підвищення надійності експлуатації ковзних електричних контактів міського електротранспорту.

Основні результати дисертаційної роботи Ковалю В.А. використовуються в лекційному курсі і при проведенні практичних занять з дисциплін "Нові та високоефективні технології в машинобудуванні", "Вибір конструкційних матеріалів обробки металів тиском" на кафедрі "Технології машинобудування" Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

Акт обговорений і схвалений на засіданні кафедри технології машинобудування (протокол № 4 від 12.12.2012 р.).

Зав. кафедри "технології
машинобудування", д. т. н., проф.

В.В. Драгобецький

АКТ

про початок експлуатаційних випробувань композиційних вугільних вставок

№ 4

від 12 січня 2011 р.

Ми, що нижче підписалися, представники Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (КрНУ), керівник науково-дослідної роботи доцент Сергієнко С.А., аспірант Коваль В.А. з одного боку і представники КП «Кременчуцьке тролейбусне управління» директор Вертюх О.М., головний інженер Алексєєв О.О. з другого боку склали даний акт про те, що досліджувані композиційні струмознімальні вставки встановлено 12.01.2011 р. на кожному струмоприймачі з 18-ти тролейбусів.

Представники КП «Кременчуцьке
тролейбусне управління»:



Директор [Signature] О.М. Вертюх

Головний інженер [Signature] О.О. Алексєєв

Представники КрНУ

ім. М. Остроградського:



Керівник НДР [Signature] С.А. Сергієнко

Аспірант [Signature] В.А. Коваль

АКТ

про хід експлуатаційних випробувань композиційних вугільних вставок

№ 6

від "24" січня 2012 р.

Ми, що нижче підписалися, представники Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (КрНУ), керівник науково-дослідної роботи доцент Сергієнко С.А., аспірант Коваль В.А. з одного боку і представники КП «Кременчуцьке тролейбусне управління» директор Вертюх О.М., головний інженер Алексєєв О.О. з другого боку склали даний акт про результати експлуатаційних досліджень композиційних струмознімальних вставок, встановлених на кожному струмоприймачі з 18-ти тролейбусів за період з 12.01.2011 по 12.01.2012 р.

За час експлуатації композиційних струмознімальних вставок з 12.01.2011 по 12.01.2012 підвищення середнього питомого зносу контактних проводів не спостерігалось на жодній з діляниць, де рухався міський електротранспорт.

Результати замірів зносу композиційних струмознімальних вставок від пробігу міського електротранспорту наведені в додатку до цього акту.

Представники КП «Кременчуцьке
тролейбусне управління»:



Директор [Signature] О.М. Вертюх

Головний інженер [Signature] О.О. Алексєєв

Представники КрНУ

ім. М. Остроградського:



Керівник НДР [Signature] С.А. Сергієнко

Аспірант [Signature] В.А. Коваль