

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»
(назва факультету)

«Транспортна інфраструктура»
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
ОС «магістр»
(ступінь вищої освіти)

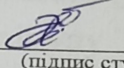
на тему: Аналіз роботи пантографів тягового рухомого складу залізниць
України з позицій інтероперабельності
за освітньою програмою «Інтероперабельність і безпека
на залізничному транспорті»

зі спеціальності: 273 Залізничний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: ІН2226

Керівник:

Нормоконтролер:


(підпис студента)


(підпис)


(підпис)

/ Роман ХОМА /

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

/ проф. Микола КУЗІН /

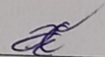
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

/ зав. каф. Олексій ТЮТЬКІН /

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

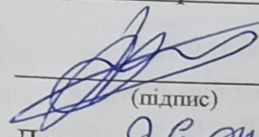
Дніпро – 2024 рік

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»
Кафедра: «Транспортна інфраструктура»
Рівень вищої освіти: «Магістр»
Освітня програма: «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»
Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
«Транспортна інфраструктура»



Олексій ТЮТКІН
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата 29.04.2023

ЗАВДАННЯ

ОС «магістр»
(ступінь вищої освіти)

на кваліфікаційну роботу

студенту Хомі Роману Васильовичу
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Аналіз роботи пантографів тягового рухомого складу залізниць України з позицій інтероперабельності»

Керівник роботи: Кузін Микола Олегович, д.т.н., професор
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від «28» квітня 2023 р. № 360ст

2. Строк подання студентом роботи: «15» січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Результати аналізу українських та європейських нормативних документів та наукової літератури, які присвячені роботі пантографів тягового рухомого складу.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

Вступ. Розділ 1. Будова пантографів локомотивів та особливості їх роботи.

Розділ 2. Нормативна база країн ЄС та України, що регламентує роботу

сучасних струмоз'ємних пристроїв. Розділ 3. Пошук можливостей структурної

та елементної оптимізації функціонування пантографів. Розділ 4. Оптимізація

експлуатаційних параметрів струмоз'ємних пристроїв залізниць України згідно

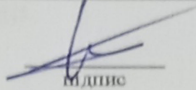
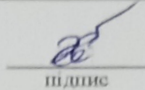
міжнародних документів. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Презентація за матеріалами досліджень, викладених в магістерській роботі

(PowerPoint, 15...20 слайдів).

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Всі розділи	Кузін М.О., професор	 підпис 02.05.2023	 підпис 02.05.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Будова пантографів локомотивів та особливості їх роботи.	30.10.2023- 19.11.2023	ВИКОНАНО
2	Розділ 2. Нормативна база країн ЄС та України, що регламентує роботу сучасних струмоз'ємних пристроїв.	20.11.2023- 17.12.2023	ВИКОНАНО
3	Розділ 3. Пошук можливостей структурної та елементної оптимізації функціонування пантографів.	18.12.2023- 07.01.2024	ВИКОНАНО
4	Розділ 4. Оптимізація експлуатаційних параметрів струмоз'ємних пристроїв залізниць України згідно міжнародних документів.	18.12.2023- 03.01.2024	ВИКОНАНО
5	Висновки.	03.01.2024- 07.01.2024	ВИКОНАНО
6	Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.	08.01.2024- 14.01.2024	ВИКОНАНО
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2024	ВИКОНАНО
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	Згідно з планом ЕК	

Студент


(підпис)Роман ХОМА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи


(підпис)Микола КУЗІН
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Будівництво, архітектура та інфраструктура»
(назва факультету)

«Транспортна інфраструктура»
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
ОС «магістр»
(ступінь вищої освіти)

на тему: Аналіз роботи пантографів тягового рухомого складу залізниць
України з позицій інтеперабельності
за освітньою програмою «Інтеперабельність і безпека
на залізничному транспорті»

зі спеціальності: 273 Залізничний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: студент групи: ІН2226

_____ / Роман ХОМА /
(підпис студента) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: _____ / проф. Микола КУЗІН /
(підпис) (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер: _____ / зав. каф. Олексій ТЮТКІН /
(підпис) (посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Building, architecture and infrastructure
(faculty)

Transport infrastructure
(department)

Explanatory Note
to Master's Thesis
Master
(higher education degree)

on the topic: Analysis of operation of pantographs of traction rolling stock of
railways of Ukraine from the standpoint of interoperability
according to educational curriculum Interoperability and safety in railway transport
in the Specialization: 273 Railway Transport
(Specialization and its code)

Done by the student of the group: IH2226 / Roman CHOMA /
(name, surname)

Scientific Supervisor: / Prof. Mykola KUZIN /
(position, name, surname)

Normative controller: / Head of Dept. Oleksii TIUTKIN /
(position, name, surname)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

Кафедра: «Транспортна інфраструктура»

Рівень вищої освіти: «Магістр»

Освітня програма: «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

Спеціальність: 273 «Залізничний транспорт»

(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«Транспортна інфраструктура»

_____ **Олексій ТЮТЬКІН**

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата _____

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

ОС «магістр»

(ступінь вищої освіти)

студенту Хомі Роману Васильовичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Аналіз роботи пантографів тягового рухомого складу залізниць України з позицій інтероперабельності»

Керівник роботи: Кузін Микола Олегович, д.т.н., професор

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від _____ «28» квітня 2023 р. № 360ст

2. Строк подання студентом роботи: «15» січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Результати аналізу українських та європейських нормативних документів та наукової літератури, які присвячені роботі пантографів тягового рухомого складу.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

Вступ. Розділ 1. Будова пантографів локомотивів та особливості їх роботи. Розділ 2. Нормативна база країн ЄС та України, що регламентує роботу сучасних струмоз'ємних пристроїв. Розділ 3. Пошук можливостей структурної та елементної оптимізації функціонування пантографів. Розділ 4. Оптимізація експлуатаційних параметрів струмоз'ємних пристроїв залізниць України згідно міжнародних документів. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Презентація за матеріалами досліджень, викладених в магістерській роботі (PowerPoint, 15...20 слайдів).

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
Всі розділи	Кузін М.О., професор	_____ підпис 02.05.2023	_____ підпис 02.05.2023

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Будова пантографів локомотивів та особливості їх роботи.	30.10.2023-19.11.2023	
2	Розділ 2. Нормативна база країн ЄС та України, що регламентує роботу сучасних струмоз'ємних пристроїв.	20.11.2023-17.12.2023	
3	Розділ 3. Пошук можливостей структурної та елементної оптимізації функціонування пантографів.	18.12.2023-07.01.2024	
4	Розділ 4. Оптимізація експлуатаційних параметрів струмоз'ємних пристроїв залізниць України згідно міжнародних документів.	18.12.2023-03.01.2024	
5	Висновки.	03.01.2024-07.01.2024	
6	Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.	08.01.2024-14.01.2024	
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2024	
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	Згідно з планом ЕК	

Студент

_____ (підпис)

Роман ХОМА
_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Микола КУЗІН
_____ (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

76 стор., 11 рис., 6 табл., 24 літературних джерела.

Об'єктом дослідження даної роботи є вимоги нормативних документів до роботи струмоз'ємних пристроїв, що діють на території країн ЄС та України.

Метою роботи є розробка практичних рекомендацій для впровадження технічних рішень для підвищення строку служби пантографів, які одночасно відповідали б вимогам стандартів країн Європи та документації УЗ.

У даній дипломній роботі використані такі теоретичні та емпіричні методи: *метод математичного моделювання у динаміці твердого тіла* (при складанні рівнянь коливань багатоелементного пантографа), *аналізу та синтезу, сучасні підходи трибології, матеріалознавства, інженерії поверхні, метод агрегування* (принцип «модульності», коли новий деякий виріб (вузол) створюється на основі комбінації вже наявних уніфікованих деталей, які мають певну сумісність за показниками експлуатації та розмірами), *метод локальної модернізації*.

В роботі проведений аналіз технічної літератури, яка присвячена особливостям роботи систем струмознімання у тяговому рухомому складі як в Україні, так і в країнах ЄС.

Встановлено, що в УЗ та ЄС вимоги до функціонування пантографів є дещо схожі, проте відрізняються вимогами до геометричних параметрів (габаритів) пантографів, матеріалу, статичних та динамічних навантажень.

З метою уніфікації технічних рішень у сфері функціонування пантографів та їх удосконаленню в роботі, на основі підходів механіки твердого тіла та порошкової металургії, були запропоновані рішення, що дозволяють не тільки локально уніфікувати роботу пантографів, але й подовжити їх строк служби.

Ключові слова: ПАНТОГРАФИ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 БУДОВА ПАНТОГРАФІВ ЛОКОМОТИВІВ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ РОБОТИ.....	11
1.1 Будова пантографів тягового рухомого складу залізничного транспорту.....	11
1.2 Умови роботи та експлуатаційні вимоги до сучасних струмоз’ємних пристроїв локомотивів.....	16
1.3 Висновки.....	24
2 НОРМАТИВНА БАЗА КРАЇН ЄС ТА УКРАЇНИ, ЩО РЕГЛАМЕНТУЄ РОБОТУ СУЧАСНИХ СТРУМОЗ’ЄМНИХ ПРИСТРОЇВ.....	25
2.1 Вимоги щодо струмоз’ємних пристроїв згідно TSI Loc&Pas.....	25
2.2 Нормативні документи України та їх вимоги щодо пантографів тягового рухомого складу.....	28
2.3 Висновки.....	31
3 ПОШУК МОЖЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕМЕНТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПАНТОГРАФІВ.....	32
3.1 Розробка математичної моделі функціонування пантографа як струмоз’ємного пристрою.....	32

3.2 Аналіз моделі із позицій пошуку шляхів оптимізації роботи пантографу.....	36
3.3 Висновки.....	37
4 ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУМОЗ’ЄМНИХ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ ЗГІДНО МІЖНАРОДНИХ ДОКУМЕНТІВ.....	38
4.1 Аналіз можливостей оптимізації експлуатаційних параметрів характеристик струмоз’ємних пластин.....	38
4.2 Можливості прикладної трибології при подовженні строки служби вузлів тертя.....	39
4.3 Розробка підходів щодо підвищення експлуатаційних параметрів контактних пластин.....	57
4.4 Висновки.....	71
ВИСНОВКИ.....	72
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	75

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

1. TSI (Technical Specification for Interoperability) - Технічна специфікація для функціональної сумісності
2. Е.р.с. – електрорухомий склад
3. ПТЕ – правила технічної експлуатації
4. ЖЦ – Життєвий цикл
5. УЗ – публічне акціонерне товариство "Укрзалізниця
6. ДСТУ – державний стандарт України.
7. ТРС (трс) – тяговий рухомий склад

ВСТУП

На даний час залізничний транспорт України є одним із базових перевізників держави, що забезпечує значну частку перевезень як вантажів, так і пасажирів. При цьому ці перевезення здійснюються як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках. Відмітимо, що залізничний транспорт України – це єдиний виробничо-технологічний комплекс, що забезпечує не тільки перевезення, але й ремонт рухомого складу.

Ці функції є критично важливим для держави, оскільки саме цей вид транспорту забезпечує функціонування економіки в цілому.

Разом із тим питання підвищення пропускної спроможності, приведення парку рухомого складу у відповідність до вимог міжнародних стандартів є відкритими.

Це дещо стримує зовнішньоекономічну діяльність України, розвиток її транспортних коридорів, проведення експортно-імпортних операцій, що завдає певних збитків економіці України.

Відмітимо, що питання до зняття цих обмежень є відкритими. Тут існують багато шляхів їх розв'язання.

Серед них і узгодження законодавчої бази, прийняття спільної та відкритої фіскальної політики, економічні преференції. Але технічна сторона прийняття відповідних технологічних рішень залишається відкритою.

Разом із тим, сучасні вимоги ринку, що глобалізується на очах, стрімкий розвиток транспортних послуг, який призводить до підвищення конкуренції, висувають необхідність узгодження міждержавної нормативної документації до роботи тягового рухомого складу у тому числі у сфері його струмомоз'єму, що викликає необхідність у впровадженні конструктивних та технічних рішень, що для економіки України є заскладними та непідйомними через її непростий фінансовий стан.

У цьому зв'язку, перспективним вбачається впровадження підходів, згідно яким є «локальне узгодження» нормативних документів, що дозволяє з однієї сторони суттєво зменшити фінансові вкладення у роботу локомотивів, його безпеки та експлуатації, а з іншої сторони – відпрацювати рішення, що дозволяють вже пройшли свою апробацію.

1 БУДОВА ПАНТОГРАФІВ ТЯГОВОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ З ПОЗИЦІЙ ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ

1.1 Будова пантографів локомотивів та особливості їх роботи.

На даний час у рухомому складі використовується достатньо велика кількість схем пантографів [1].

Розглянемо будову даних систем більш детально.

Згідно [2], система рухомих рам призначена для забезпечення надійного контакту полоз (лиж) струмоприймача (пантографа) з контактними проводами при зміні висоти останніх в заданих межах. Для магістральних залізниць ця висота становить 5550...6900 мм. Діапазон робочих висот струмоприймача (400...1900 мм) визначає розміри його конструкції.

Основні схеми систем рухомих рам струмоприймачів можуть бути класифіковані так: пантографи; напівпантографи симетричні; напівпантографи асиметричні: штангові струмоприймачі та струмоприймачі з рухомою основою.

На колії 1520 мм найбільш поширені є ромбічні пантографи типу ДЖ-5, П-1, П-3, Т-5, 10PP, 17PP, 2SLS-1 та ін (рис.1.1. а, б).

У Японії для економії місця на даху ЕРС застосовують Х-подібні (рис. 1.1, в) пантографи. Головні вали пантографа з'єднують між собою тягою антипаралелограма, що забезпечує їх синхронний поворот, і, як наслідок, вертикальне переміщення верхніх шарнірів.

Конструкція симетричних напівпантографів (рис. 1.1, г) дає можливість зменшити габарити основи струмоприймача і його металоємність. Однак, при цьому з'являється підвищене навантаження на підшипники середніх шарнірів. До таких напівпантографів відносяться струмоприймачі типу П-7, Л-13У, Л-14М та інші.

Асиметричні напівпантографи знайшли широке застосування за кордоном. У порівнянні з симетричними, вони мають меншу масу і габарити. Такі струмоприймачі активно впроваджує французька фірма «Faiveley». У країнах СНД розроблені струмоприймачі такого типу ПН-2 для електровозу ВЛ-41, Тас-11 для ЕП-200, ТП-250. Вони ефективні у разі застосування високоміцних матеріалів та точної технології.

Штангові рами струмоприймачів застосовують для тролейбусів, трамваїв, метрополітену. Вони знову привернули увагу у зв'язку з прагненням знизити наведену масу струмоприймача, зробити його малошумним, а рами — статично визначені. До недоліків трамвайної штанги (бугеля) відноситься поворот контактної вставки навколо своєї осі за зміни висоти підйому. Більш раціональним є варіант з ланцюговою або тросовою передачею (рис. 1.1, ж), що застосовується для штангових струмоприймачів (ТС-3М, 5М70). Вони являють собою статично визначальну конструкцію, що не боїться перекосів, з мінімальними тертям та масою.

Струмоприймачі з рухомою основою (рис. 1.1, є) виникли у зв'язку із прагненням знизити наведену масу так, щоб забезпечити роботу при швидкостях понад 55 м/с (200 км/год). Висота рухомої основи підтримується спеціальним авторегулюючим пристроєм, що спрацьовує, наприклад, перед входом у тунель зі зниженими контактними проводами.

Наведемо найбільш розповсюджені схеми, які прийняті на залізничному транспорті на даний час [2].

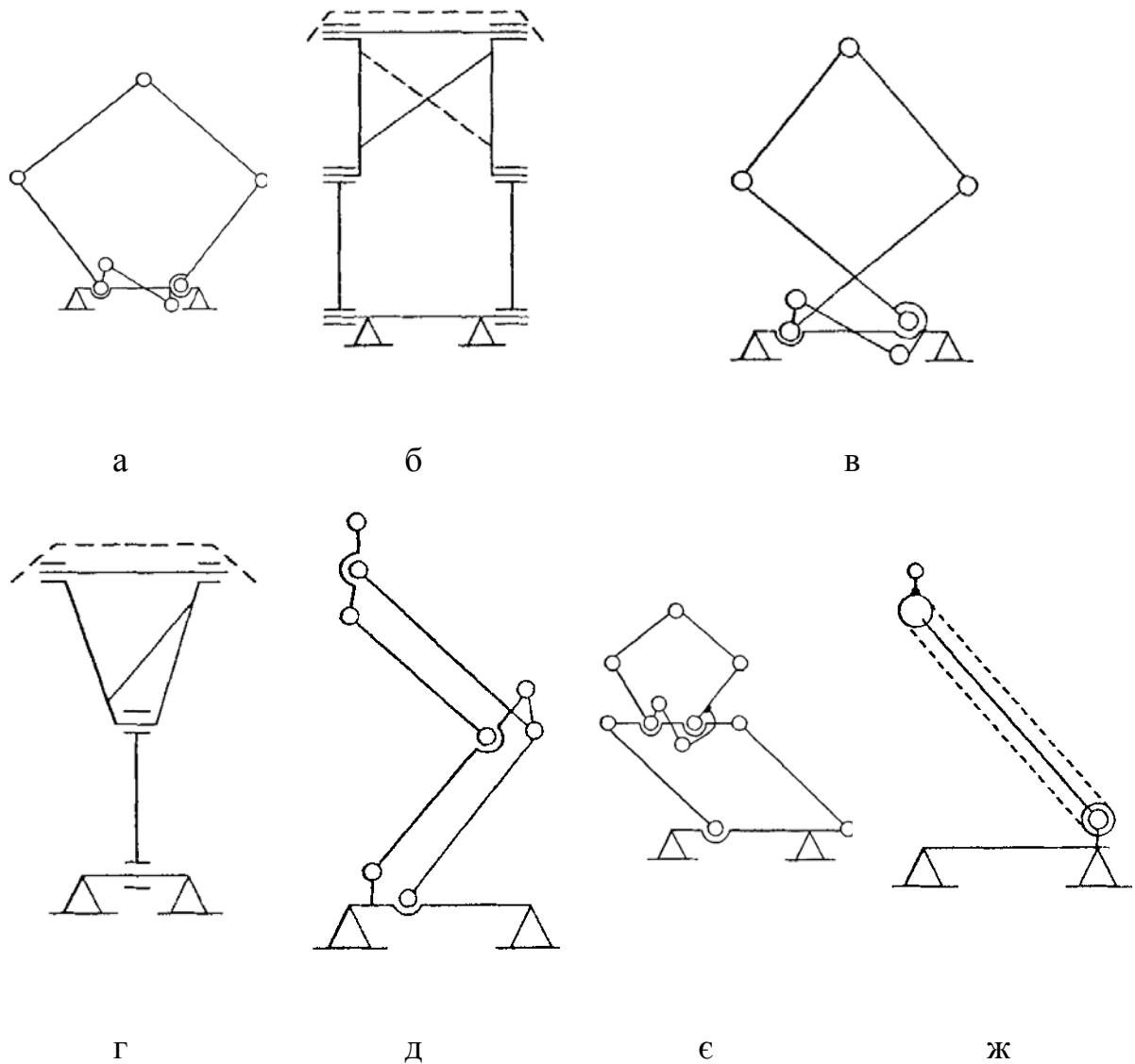


Рис. 1.1. Основні системи рухомих рам струмоприймачів: а, б – ромбічні пантографи; в – Х-подібні пантографи; г – симетричні напівпантографи; д - асиметричні напівпантограф; е – з рухомою основою; ж - штангові з тросовою або ланцюговою передачею.

Згідно літературного джерела [3], виготовлені в нашій державі та широко впроваджені на магістралях залізничного електротранспорту механізми струмоз'ємних пантографів мають задовольняти вимоги ГОСТ 12058-72, призначені для електрорухомого складу колії з постійним і змінним електричним струмом із швидкістю руху поїздів до 160 км/год. Залежно від струмового навантаження передбачено виготовлення струмоз'ємних механізмів двох типів:

тип Т призначений для вантажних і пасажирських електровозів постійного струму та подвійного живлення;

тип Л призначений для вантажних і пасажирських електровозів змінного струму та електропоїздів постійного і змінного електричного струму.

Для високошвидкісного електрорухомого складу залізниці, особливо для електровозів ЧС200 та електропоїздів ЕР200, які призначені для роботи із швидкостями до 200 км/год на сьогодні розроблені спеціальні струмоз'ємні пантографи Сп-6М та Сп-6У, що конструктивно виконані двоярусними.

Цей струмоз'ємний механізм, порівнювано із звичайними, має значно менші розміри і масу. Це є однією з основних умов забезпечення доброї якості струмоз'єму при великих швидкостях руху.

Розглянемо більш детально будову чотири важільного струмоприймача (рис. 1.2) [3].

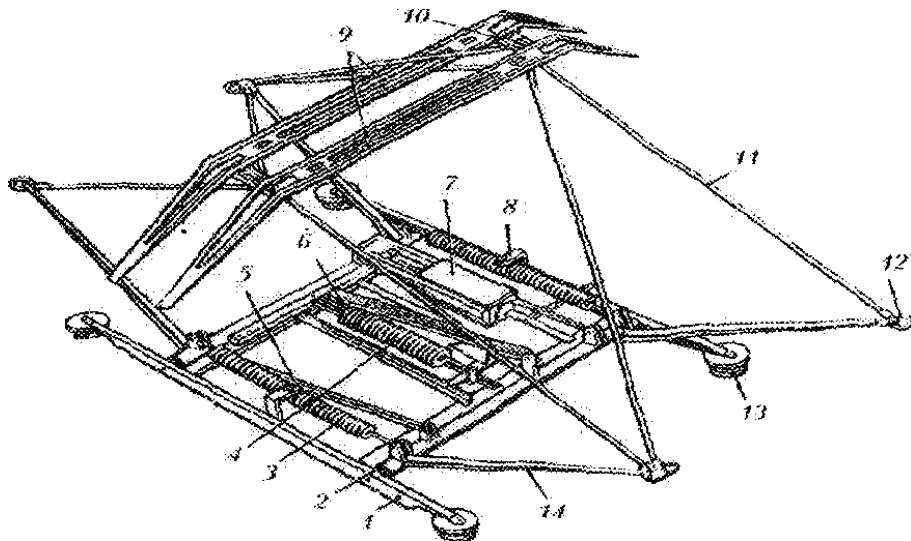


Рис. 1.2. Чотириважільний струмоприймач: 1 - основа на ізоляторах; 2 - два вали нижньої рами; 3 - підйомні пружини; 4 - опускаюча пружина; 5 - пневматичний привод; 6 - тяга; 7 - циліндр; 8 - амортизатори; 9 - полоз; 10 - каретка; 11— верхня трубчата рама; 12 - з'єднувачі; 13 - ізолятори; 14 - труби нижньої рами.

На даний час на рухомому складі УЗ використовуються наступні типи струмоприймачів – табл. 1.1 [3].

Таблиця 1.1

**Типи струмоприймачів, що використовуються на рухомому складі
України**

Типи пантографів	Кількість полозів	Кількість важелів рухомої системи	Електровози	Електропоїзди
ДЖ-5 ДЖ-5К	1	4	ВЛ19, ВЛ22, ВЛ22 ^М	C_3^P , C_3^D
П-3 П-3А	2	4	ВЛ23, ВЛ8	-
Т-5	2	4	ВЛ10, ВЛ10 ^У , ВЛ11	-
10РР 17РР	1	4	ЧС2, ЧС2 ^Т , ЧС6, ЧС7	-
СП-6М	1	4	ЧС200	ЕР200
П-1В	1	4	ВЛ60, ВЛ60 ^П , ВЛ60 ^К	ЕР1, ЕР2
ГГ-7А	1	2	ВЛ60 ^Р , ВЛ80 ^К , ВЛ80 ^Р , ВЛ80 ^Т , ВЛ80 ^С , ВЛ85	ЕР1, ЕР2, ЕР22, ЕР22 ^М
Л-13У	1	2	ВЛ80 ^К , ВЛ80 ^Р , ВЛ80 ^Т , ВЛ80 ^С , ВЛ85	ЕР9П, ЕР9М, ЕР1, ЕР2, ЕР22, ЕР22 ^М
2SLS-1 3SLS-1	1	4	ЧС4, ЧС4 ^Т , ЧС8	

Будова двоярусного струмоз'ємного пристрою показана на рис. 1.3.

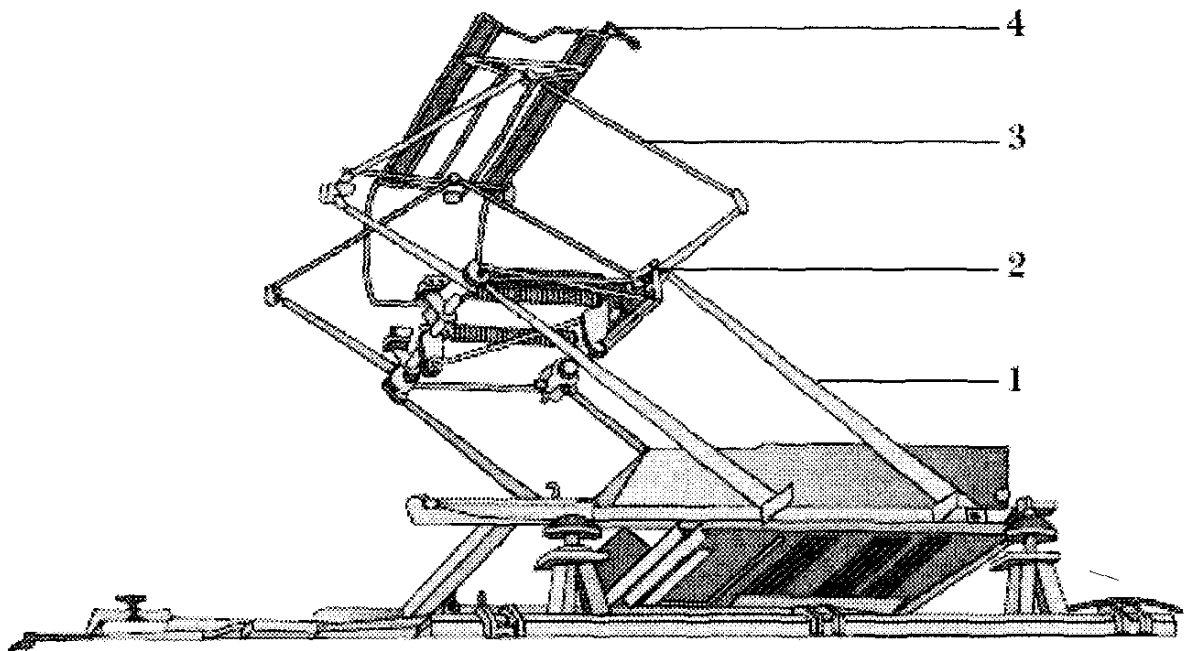


Рис. 1.3. Двоярусний струмоз'ємний механізм для високошвидкісного електрорухомого складу залізниці: 1 — нижня рухома рама; 2- шарнірне з'єднання нижньої та верхньої рам; 3 - верхня рухома рама; 4 - полоз.

Проведений аналіз конструктивних відмінностей струмоприймачів рухомого складу показує, що на даний час є достатньо широке різноманіття засобів струмоприймання, що використовується на рухомому складі. Разом із тим вибір та оптимізація конструкції струмоприймача на даний час є відкритою науковою проблемою.

Тому можна зробити висновок, що струмоз'ємні механізми рухомого складу мають суттєві конструкційні відмінності в залежності від умов експлуатації та технічних вимог, які до них ставляться, і, відповідно, вимагають різних підходів до аналізу їх роботи.

1.2 Умови роботи та експлуатаційні вимоги до сучасних струмоз'ємних пристроїв локомотивів

Умови роботи та експлуатаційні вимоги до сучасних струмоз'ємних пристроїв локомотивів будемо розглядати на основі літературного джерела [4].

Контактна мережа та струмоприймачі е.р.с., що постійно взаємодіють між собою, повинні забезпечувати надійний та економічний процес струмознімання, тобто, безвідмовність роботи цих пристроїв у процесі взаємодії та мале зношування контактних проводів.

Якість струмознімання на електрифікованих лініях визначається двома основними факторами: умовами механічної взаємодії рухомого струмоприймача та контактної підвіски; вибором матеріалів контактуючих частин: контактного дроту та струмознімальних елементів струмоприймача.

Тут розглядається перший із двох факторів. Другий фактор буде розглядатись у наступних розділах даної дипломної роботи.

Важливість першого фактору визначається тим, що погіршення умов механічної взаємодії, зокрема порушення контакту, призводить не тільки до відмов контактної мережі та струмоприймачів, але й до зниження стійкості роботи електроустаткування е.р.с., підвищення рівня перешкод у пристроях зв'язку, розташованих поблизу залізних доріг, а також до збільшення трудових витрат на утримання та ремонт контактної мережі та струмоприймачів через підвищений знос у ковзному контакті.

Взаємодія струмоприймача та контактної підвіски є складним механічним процесом, так як в обох взаємодіючих пристроях залежно від положення точки контакту та умов її переміщення змінюються жорсткість, маса, сили тертя.

Під час руху е.р.с. висота полоза струмоприймача над рівнем головок рейок не залишається однаковою, що пояснюється зміною висоти підвісу контактного дроту, еластичності та маси підвіски в прольоті. З іншого боку, при проході однієї і тієї ж точки контактної мережі різними струмоприймачами підйом контактного проводу під їх впливом виявляється неоднаковим; він залежить від статичного натискання струмоприймача, його наведеної маси та швидкості руху е.р.с., що впливає на аеродинамічну підйомну силу струмоприймача.

Основним критерієм якості механічної взаємодії струмоприймача та контактної підвіски є ступінь сталості контактного натискання, тобто натискання в контактні між струмоприймачем та проводом у процесі руху е.р.с.

Якщо контактне натискання близько до постійного, це означає, по-перше, що немає відривів полоза струмоприймача від контактного дроту, тобто не створюються умови підвищеного електричного зносу дроту і струмознімних елементів полоза. Відриви струмоприймача від дроту і вкрай низькі контактні натискання в експлуатаційних умовах легко визначаються по іскрінню, яке періодично з'являється в контактні під час руху е.р.с., особливо в той час, коли тяговий струм значний.

Якщо контактне натискання близько до постійного, то це означає, по-друге, що не відбувається помітних підвищення його в жорстких точках контактної підвіски, тобто не створюються умови для підвищеного механічного зносу дроту і струмознімальних елементів. Місця з підвищеним контактним натисканням можна визначити оглядом контактного дроту: тут провід має підвищений знос, тобто меншу висоту перерізу, що залишився, ніж на відстані 2..5 м від цієї точки.

Контактне натискання складається з трьох складових:
статичного натискання струмоприймача,
динамічної (інерційної) та аеродинамічної підйомної сил.

Статичне натискання струмоприймача є натисканням полоза нерухомого струмоприймача на контактний провід. Воно створюється робочими (підйомними) пружинами струмоприймача. На його значення впливають сили тертя в шарнірах рухомої системи: при русі полоза вниз (при опусканні динамометра в процесі вимірювання) статичне натискання виявляється більшим, ніж при русі вгору, на подвоєне значення цієї сили.

У струмоприймачів важкого типу (*типу Т*), призначених для вантажних та пасажирських електровозів постійного струму та подвійного живлення та розрахованих під час руху на знімання з контактного дроту тривалого струму

до 2200 А, статичне натискання має знаходитися в межах 9-13 кгс. У струмоприймачів легкого типу (*туну Л*), призначених для вантажних та пасажирських електровозів змінного струму та електропоїздів обох систем струму та розрахованих під час руху на знімання струму до 500 А, діапазон статичного натискання 6...10 кгс.

Динамічна інерційна сила, що виникає в контактї, залежить від значень наведеної маси струмоприймача та вертикального прискорення цієї маси.

Наведеною масою струмоприймача називається умовна маса, зосереджена в точці зіткнення полоза з контактним проводом і надає в процесі руху е.р.с. таке ж вплив па провід, як і реальний струмоприймач. На значення цієї маси найбільший вплив мають маси рухомих частин, розташованих ближче до дроту (полоза, кареток, верхніх рухомих рам), оскільки при зміні висоти полозу при русі е.р.с. вони переміщуються у вертикальному напрямі із найбільшими прискореннями.

Вертикальне прискорення наведеної маси струмоприймача залежить від швидкості руху е.р.с., характеру зміни еластичності контактної підвіски в прольоті, і від стріли провісання контактного проводу. При розробці контактних підвісок для забезпечення хорошого струмознімання прагнуть до того, щоб еластичність підвіски у всіх точках прольоту була якомога більшою. Однак більшість контактних підвісок, змонтованих на електрифікованих дорогах, таку вимогу не задовольняють. Стріла провісання троса напівкомпенсованої підвіски, що несе, змінюється при зміні температури навколишнього повітря і тому здебільшого контактний провід не розташовується без провисання.

Обидві ці обставини - неоднакова еластичність і наявність стріли провисання контактного проводу - є причинами того, що траєкторія полоза зазвичай нелінійна, тобто струмоприймач у кожному прольоті рухається з вертикальним прискоренням.

Для зниження інерційної сили, що викликає зміни контактного натискання, конструктори намагаються зменшувати наведену масу струмоприймачів. Однак це пов'язано з великими труднощами, оскільки конструкція струмоприймача має бути досить міцною, а площі перерізу його струмопровідних елементів розраховані на перебіг нормованого тривалого струму. Чинним стандартом наведена маса струмоприймачів важкої серії обмежується значенням 45 кг легкої серії - 33 кг.

Аеродинамічна підйомна сила виникає в результаті впливу на струмоприймач повітряного потоку. Вона прямо пропорційна квадрату швидкості обтікає струмоприймач потоку і залежить від його напрямку, а також площ перерізів та конфігурації окремих елементів струмоприймача. Остання характеризується кожного елемента коефіцієнтом підйомної сили, значення цих коефіцієнтів визначаються експериментально, при продування зразків в аеродинамічній трубі.

Численні натурні випробування показали, що з усіх елементів струмоприймача найбільший вплив на значення його аеродинамічної підйомної сили надає конструкція полоза, зазвичай підйомна сила рам не перевищує 30% підйомної сили полоза.

За відсутності вітру швидкість повітряного потоку дорівнює швидкості руху е.р.с., при зустрічному вітрі вона дорівнює сумі швидкостей руху рухомого складу та вітру.

На електровозі, що рухається, навіть в умовах повного безвітря аеродинамічна підйомна сила переднього і заднього струмоприймачів неоднакова. Це пояснюється залежністю підйомної сили від кута атаки повітряного потоку в зоні розташування полозу, тобто від напрямку потоку відносно горизонтальної площини. Як показали випробування, кути атаки в зонах розташування смуг передніх піднятих струмоприймачів електровозів зазвичай знаходяться в межах від +2 до +2,5 °, а в зонах смуг задніх піднятих струмоприймачів - в межах від +1 до +1,5 °. Така різниця в кутах атаки, що

визначає менші значення підйомної сили на задньому струмоприймачі, а отже, і менші відтискання ним контактного дроту, є однією з обставин, що визначили нормальний режим роботи електровоза на цьому струмоприймачі. (Інша причина вибору заднього струмоприймача як робочого полягає в тому, що при сильному руйнуванні піднятого переднього струмоприймача в аварійній ситуації його елементи, що відірвалися, можуть пошкодити опущений резервний струмоприймач, що рухається за ним.)

Кути атаки в зоні полозів піднятих струмоприймачів електропоїзда близькі до нуля, повітряні потоки на значній відстані від його лобової стінки на висоті понад 1 м над дахом стають практично горизонтальними

Бічні вітрові потоки особливо сильно впливають на струмоприймач при проході електрорухомим складом високих насипів. Обтікаючи насип і рухомий склад, що знаходиться на ній, повітряний потік в приземному шарі деформується і змінює свої параметри насип), а кути атаки в площині перпендикулярної осі шляху, складаючи в середньому $+16^\circ$, досягають в окремі моменти $+43^\circ$.

Зазвичай при конструюванні струмоприймачів вживають заходів до зниження аеродинамічної підйомної сили. Це необхідно для того, щоб зменшити залежність підйомної сили, а отже, і контактного натискання від швидкості і напрямку вітру, тобто виключити суттєве збільшення відтискання контактної мережі струмоприймачем в умовах сильного вітру. Таким чином, мала аеродинамічна підйомна сила струмоприймача сприяє зниженню пошкодження контактної мережі.

Однак було б помилкою вважати, що нульова аеродинамічна підйомна сила — ідеал, якого слід прагнути.

Справа в тому, що в процесі руху динамічна сила в залежності від знака вертикального прискорення струмоприймача може бути позитивною або негативною, тобто викликати збільшення контактної мережі чи зменшення його. При русі е.р.с з підвищеною швидкістю по ділянці, яка

обладнана нерівноеластичною контактною підвіскою, або, особливо, по ділянці з напівкомпесованою підвіскою, коли стріли провисання контактного проводу великі, контактне натискання в моменти появи негативних інерційних сил стає рівним нулю, тобто контакт між полозом та проводом порушується.

Такі порушення контакту можна виключити збільшенням двох інших складових контактного натискання – статичного натискання та аеродинамічної підйомної сили. Однак збільшувати статичне натискання понад оптимальне недоцільно, так як це призведе до посилення механічного зносу контактного проводу і струмознімних пластин полоза на всій ділянці, в тому числі і там, де швидкість руху е.р.с. невелика і порушення контакту не виникає.

На противагу цьому, невелика аеродинамічна підйомна сила, значення якої пропорційно квадрату швидкості зустрічного повітряного потоку, помітно збільшує контактне натискання не скрізь, а саме там, де контакт погіршується.

Аеродинамічна характеристика робочого струмоприймача, встановленого на е.р.с., вважається задовільною, якщо при швидкості обдування 160 км/год для струмоприймачів легкого типу і 120 км/год важкого аеродинамічна підйомна сила перевищує середнє статичне натискання не більше ніж 1,8.

Про динамічні якості найбільш поширених струмоприймачів можна судити за даними, наведеними в табл. 1.2 [4].

На умови взаємодії струмоприймача і контактної підвіски в жорстких точках і на нерівностях контактного проводу впливає конструктивне виконання і параметри верхнього вузла струмоприймача - кареток і полоза. Основне призначення кареток - пружних елементів, за допомогою яких полози з'єднуються з рухомими рамами струмоприймача - знизити вплив маси рухомих рам на контактне натискання в моменти проходження струмоприймачем зазначених нерівностей і жорстких точок. У двополозних струмоприймачів каретки забезпечують також рівномірний розподіл натискання між полозами.

Таблиця 1.2

**Експлуатаційні параметри струмоприймачів, що використовуються
на рухомому складі України**

Типи струмоз'ємних пантографів	Кількість полозів	Електровози	Діапазон статичного натиснення, кгс	Середня приведена маса, кг	Аеродинамічна підйомна сила, кгс, при швидкості 150 км/год
ДЖ-5К	1	ВЛ19, ВЛ22, ВЛ22 ^М	5.5...9.5	32.5	-
П-1Б	1	ЭР1, ЭР2, ЭР10	7...11	33.5	-
П-3А	2	ВЛ23, ВЛ8	8...12	44.5	-
Т-5	2	ВЛ10, ВЛ10 ^У , ВЛ11	10...13	46	14.5
10РР2, 17РР2	1	ЧС2, ЧС2 ^Т , ЧС6, ЧС7	8...12	43	7.7
СП-6М	1	ЧС200	8...11	24.5	3.5
П-1В	1	ВЛ60, ВЛ60 ^П , ВЛ60 ^К	7...11	33.5	-
Л-13У	1	ВЛ80 ^К , ВЛ80 ^Р , ВЛ80 ^Т , ВЛ80 ^С , ВЛ85	6...9	33.5	5.6
2SLS-1 3SLS-1	1	ЧС4, ЧС4 ^Т	6...9	30.7	4

1.3 Висновки

1. Розглянуті будова пантографів тягового рухомого складу та особливості їх роботи. Показано, що на даний момент існує багато типів струмоприймачів в залежності від умов експлуатації та технічних вимог, але вибір та оптимізація конструкції струмоприймача на даний час є відкритою науковою проблемою.

2. Проаналізовані умови роботи та вимоги до сучасних струмоз'ємних пристроїв. Встановлено, що основним параметром, який характеризує роботу струмоприймачів є процес струмознімання, що визначається умовами механічної взаємодії рухомого струмоприймача та контактної підвіски; вибором матеріалів контактуючих частин: контактного дроту та струмознімальних елементів струмоприймача.

3. Встановлено, що забезпечення заданої якості струмознімання та роботи пантографів є відкритою проблемою, що потребує свого подальшого вирішення.

2 НОРМАТИВНА БАЗА КРАЇН ЄС ТА УКРАЇНИ, ЩО РЕГЛАМЕНТУЄ РОБОТУ СУЧАСНИХ СТРУМОЗ'ЄМНИХ ПРИСТРОЇВ

2.1 Вимоги щодо струмоз'ємних пристроїв згідно TSI Loc&Pas

Розглянемо вимоги щодо струмоз'ємних пристроїв згідно TSI Loc&Pas [8].

Дані вимоги прописані у пункті 4.2.8.2 Power supply (Тягове та електрообладнання), а саме у підпункті 4.2.8.2.9 Requirements linked to pantograph (Вимоги до пантографа).

У підпункті (параграфі) 4.2.8.2.9.1 подані вимоги до робочого діапазону висоти пантографа.

У підпункті (параграфі) 4.2.8.2.9.2 подані вимоги до верхівки (головки) пантографа.

Так розрізняють декілька типів головки пантографа 1600 мм, 1950 мм, 2000/2260 мм.

Конкретні вимоги до них прописані у стандартах [9 – 10]. В Україні вони також є дійсними.

Вимоги до силу струму пантографа подані у підпункті (параграфі) 4.2.8.2.9.3 «Pantograph current capacity».

Цікавими і практично корисними є вимоги до контактних пластин, які прописані у пункті 4.2.8.2.9.4 Contact strip (IC level) «Контактні пластини», у підпункті 4.2.8.2.9.4.1 подані вимоги до геометрії контактних пластин, у підпункті 4.2.8.2.9.4.2 подані вимоги до матеріалу контактних пластин), у пункті 4.2.8.2.9.5 подані вимоги до умови статичних контактних навантажень у пантографах, у пункті 4.2.8.2.9.4.6 подані вимоги до умови статичних та динамічних контактних навантажень у пантографах, у пункті 4.2.8.2.9.4.7 подані вимоги до розташування пантографів, у підпункті 4.2.8.2.9.8 подані вимоги до проходу секції через системи поділу фаз (на рівні RST), у підпункті

4.2.8.2.9.9 подані вимоги до ізоляція пантографа від поїзда, у підпункті 4.2.8.2.9.10 подані вимоги до опускання пантографа.

Наведемо вимоги підпункту 4.2.8.2.9.4.2 «Contact strip material» («Матеріал контактних пластин»):

«(1) Матеріал, який використовується для контактних смуг (пластин), має бути механічно та електрично сумісним з матеріалом контактного дроту (як зазначено в пункті 4.2.14 ENE TSI, щоб забезпечити належний збір струму та уникнути надмірного стирання поверхні контактних проводів, тим самим зводячи до мінімуму знос як контактних проводів, так і контактних планок.

(2) Дозволяється використання звичайного вуглецю або насиченого (легованого) вуглецю з добавками.

Якщо використовується матеріал з металевою добавкою, вміст металу в вугільних контактних смугах повинен складатися з міді або мідного сплаву і не повинен перевищувати вміст 35 % за вагою, якщо використовується на лініях змінного струму, і 40 %, якщо використовується на лініях постійного струму.

Пантографи, оцінені за цією TSI, повинні бути оснащені контактними смугами з матеріалу, зазначеного вище.

(3) Додатково допускаються контактні смуги з іншого матеріалу або з більшим відсотком металевого вмісту або просоченого вуглецю з плакованою міддю (якщо це дозволено в реєстрі інфраструктури) за умови, що:

— на них є посилання у визнаних стандартах із зазначенням обмежень, якщо такі є, або

— вони були піддані випробуванню на придатність до використання (див. пункт 6.1.3.8).»

Також цікавим є вимоги підпункту 4.2.8.2.9.5 «Pantograph static contact force (IC level)» (Статична контактна сила, що діє на пантограф (рівень IC)):

«(1) Статична контактна сила — це вертикальна контактна сила, яка діє вгору голівкою пантографа на контактний провід і викликається пристроєм для підйому пантографа, коли пантограф піднято, а транспортний засіб стоїть.

(2) Статична контактна сила, що діє пантографом на контактний провід, як визначено вище, повинна регулюватися принаймні в таких діапазонах (узгоджено зі сферою використання пантографа):

- від 60 Н до 90 Н для систем живлення змінного струму,
- від 90 Н до 120 Н для систем живлення постійного струму 3 кВ,
- від 70 Н до 140 Н для систем живлення постійного струму 1,5 кВ.»

Згідно вимоги підпункту 4.2.8.2.9.6 «Pantograph contact force and dynamic behaviour» («Контактна сила та динамічна поведінка пантографа»):

«(1) Середня контактна сила F_m є середнім статистичним значенням контактної сили пантографа, яка формується статичними та аеродинамічними компонентами контактної сили з динамічною корекцією.

(2) Факторами, які впливають на середню контактну силу, є сам пантограф, його положення в складі поїзда, його вертикальне розширення та рухомий склад, на якому встановлено пантограф.

(3) Рухомий склад і пантографи, встановлені на рухомому складі, сконструйовані для накладання середньої контактної сили F_m на контактний дріт у діапазоні, визначеному в пункті 4.2.12 TSI Energy, щоб забезпечити якість збору струму без надмірного дугового розряду та для обмеження зносу та небезпеки для контактних смуг. Регулювання контактного зусилля проводиться при проведенні динамічних випробувань.

(4) Перевірка на рівні компонентів сумісності повинна підтверджувати динамічну поведінку самого пантографа та його здатність отримувати струм від повітряної контактної лінії, сумісної з TSI; процедуру оцінки відповідності, визначену пунктом 6.1.3.7.

(5) Перевірка на рівні підсистеми рухомого складу (інтеграція в конкретний транспортний засіб) повинна дозволяти регулювати контактну силу, беручи до уваги аеродинамічні ефекти, спричинені рухомим складом, і положення пантографа в фіксованому або попередньо визначеному складі

одиниці або поїзда (s); процедуру оцінки відповідності, визначену пунктом 6.2.3.20.

(6) Відповідно до TSI Energy, діапазон середньої контактної сили F_m не узгоджений для повітряних контактних ліній, розроблених для швидкості вище 320 км/год.

Тому електричні агрегати можна оцінювати лише за цим TSI щодо динамічної поведінки пантографа на швидкості до 320 км/год.

Для діапазону швидкості понад 320 км/год до максимальної швидкості (якщо вона вища за 320 км/год) застосовується процедура інноваційних рішень, описана в статті 10 і главі 6 цієї TSI.».

2.2 Нормативні документи України та їх вимоги щодо пантографів тягового рухомого складу

В Україні вимоги щодо пантографів трс задані у наступних нормативних документах [5, 11-15].

Розглянемо параметр геометрії контактної підвіски.

Висота підвісу контактного дроту на перегонах та станціях має бути такою, яка вказана у таблиці 2.1.

При електрифікації (новому будівництві, реконструкції та оновленні), для забезпечення подальшого підйому шляху висоту, підвіски при безпровісному положенні бажано витримувати: 6500 мм на перегонах та 6600 мм на станціях.

Горизонтальне відхилення контактного дроту від осі струмоприймача з довжиною робочої частини полозу 1270 мм з урахуванням прогину опори та дії вітру має бути не більше: для прямих ділянок шляху – 500 мм, для кривих – 450 мм.

Таблиця 2.1.

Параметри пантографів

Висота підвісу контактного дроту	3 кВ пост.	25 кВ 50 Гц
Номінальна	6250 мм	6250 мм
Мінімальна		
• на перегонах та станціях	5750 мм	5750 мм
• на переїздах	6000 мм	6000 мм
• у виняткових випадках з особливого дозволу	5550 мм	5675 мм
Максимальна	6800 мм	6800 мм

Ці вимоги прописані у Розділі 7 Правил [14]. Як видно, в загальному вимоги до цього параметру для залізниць країн колії 1520 мм мають незначне відхилення.

Габарит струмоприймача (пантографа).

Висота розташування, геометричні розміри та діапазон робочого ходу струмоприймача повинен забезпечувати нормальні умови струмознімання та знаходиться в межах габаритів, які відокремлені від габариту рухомого складу та від заземлених частин допустимими електроізоляційними повітряними зазорами.

Розташування струмоприймача (габарит струмоприймача) у піднятому положенні під час руху та на стоянках регламентується допустимими повітряними зазорами між частинами струмоприймача, що знаходиться під напругою, габаритом рухомого складу та заземленими частинами споруд.

В Україні дані параметри регламентуються нормативними документами [12, 14].

Середня сила притиснення струмоприймача під час руху.

Конструкція підйомного механізму струмоприймача в робочому діапазоні повинна забезпечувати статичне натискання:

- для струмоприймачів важкого типу: активний (при підйомі) 90-100 Н, пасивний (при опусканні) 100-130 Н, середнє - 95-115 Н;
- для струмоприймачів легкого типу: активне (підйом) 60-70 Н, пасивне (при опусканні) 80-90 Н, середнє - 75-80 Н.

Динамічні характеристики та якість струмоприймача.

Натяг контактного дроту (МФ-100) – 1050 Н, натяг троса, що несе (ББСМ-95, М-95) – 1425 Н, конструктивна висота підвіски 1,8 м, максимально-допустиме відтискання контактної дроту струмоприймачем в опорному вузлі – 250 мм. нерівномірності еластичності у прольоті 1,408.

Вимоги до цього параметра безпосередньо не нормуються, а забезпечуються вимогами до стану контактної мережі [12].

Відстань між струмоприймачами.

Відстань між струмоприймачами не менше 18 м відповідно до конструктивних вимог до локомотивів. Для моторвагонного рухомого складу відстань між струмоприймачами (на практиці мінімум 40 м) не становить проблем при швидкостях до 160 км/год. При зчепленій подвійній тязі підняття двох сусідніх струмоприймачів у різних одиницях рухомого складу не допускається.

З метою зменшення зношування контактної дроту, один із струмоприймачів (як правило, перший по ходу локомотива) має бути опущений при досягненні швидкості 25 км/год.

Матеріал контактної дроту.

В Україні мідь або низьколегована мідь перерізом 100 мм на головних шляхах, 85 мм на другорядних шляхах (відповідно до ГОСТ 2584-86) [16].

Як видно із проведеного аналізу, в Україні та в країнах ЄС мають як спільні параметри, так і відмінності.

Разом із тим, узгодження їх параметрів з метою моделювання та оптимізації роботи є відкритою науковою проблемою.

3.3 Висновки

1. Проведено аналіз вимог нормативних документів струмоз'ємних пристроїв згідно вимог TSI Loc&Pas. Показані вимоги до геометричних параметрів (габаритів) пантографів, матеріалу, статичних та динамічних навантажень.

2. Показані вимоги до пантографів локомотивів України згідно нормативних документів УЗ. Встановлено, що деякі параметри струмознімачів, як габарити, середня сила натиснення, динамічні характеристики регламентуються, а такі параметри як ступінь (характеристика) струмоз'єму, зносостійкість та надійність пантографів є питання відкритими.

3. Це дозволяє говорити про те, що узгодження роботи пантографів з позицій нормативів ЄС та України, з метою моделювання та оптимізації роботи є відкритою науковою проблемою.

3 ПОШУК МОЖЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРНОЇ ТА ЕЛЕМЕНТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПАНТОГРАФІВ

3.1 Розробка математичної моделі функціонування пантографа як струмоз'ємного пристрою

Відомо, що електромеханічна система струмозйому електровозів, що складається з контактної підвіски і струмоприймачів, є найбільш відповідальним елементом в ланцюзі тягового електропостачання тягового рухомого складу.

Це пов'язано з тим, що контактну мережу, на відміну інших елементів електропостачання, неможливо замінити.

У контактній парі пантограф – лінія під час передачі електричної енергії відбуваються складні і взаємопов'язані термодинамічні процеси. Вони залежать від безлічі умов, таких як матеріали, з яких виготовлені струмознімальні пластини і контактний провід, стан поверхні елементів контактної пари, геометрії струмознімальних пластин і контактного проводу, натискання в точках контакту, величини електричного струму, швидкості руху ковзного контакту, температури і вологості навколишнього середовища [17].

На силу контактного натискання також впливають різні фактори.

Багато з цих факторів мають випадковий характер (вітровий вплив, атмосферні параметри, коливання даху локомотива, стан конструкцій, стан регулювання елементів контактної підвіски і т.д.).

Це ускладнює дослідження безпосереднього процесу струмознімання за допомогою фізичних вимірювань. Вивчення взаємодії пантографів за допомогою підходів математичного моделювання дозволяє врахувати вплив усіх цих факторів.

На даний час розрізняють наступні основні режими взаємодії струмоприймачів (пантографів) з контактною підвіскою – статичний та динамічний [17, 18].

При статичній взаємодії визначаються наступні параметри контактної підвіски – геометрію контактної мережі, її натяг, «пружність» контактної підвіски.

Моделювання в динамічному режимі дозволяє визначити «квазіхвильові характеристики взаємодії контактної підвіски», зміну натягу проводів, коливання різних точок контактної підвіски, зміну контактного натискання, траєкторію точок контакту в процесі взаємодії та їх вплив на струмознімання.

Відмітимо, що саме величина контактного натиснення дозволяє визначати якість струмознімання, зношування контактної пари «струмоз’ємна пластина - провід».

На даний момент є багато моделей роботи пантографів рухомого складу. Тут можна виділити наступні літературні джерела [2, 3, 7, 17, 18].

Не будемо зупинятись на огляді математичних моделей, відмітимо тільки наступне – найбільш прості і поширені є моделі, що розглядають коливання у вертикальному напрямку.

Відмітимо деякі недоліки існуючих моделей.

Вони детально розглядають коливання пантографа як механічної системи, проте практично не враховують коливання локомотива від нерівностей колії, а також не розглядають залежність пружних і дисипативних складових пантографа від параметрів навантажень (тобто приймають їх сталими).

Ґрунтуючись на роботі [19], запропонуємо наступну модель роботи пантографа у вертикальному напрямку.

Нехай пантограф розглядається як n -масова коливальна система, що має пружні та в’язкі (розсіюючі – дисипативні) зв’язки між собою.

Локомотив також представимо як жорстку коливну масу, що має пружні та дисипативні зв’язки.

Залізничну колію представимо як жорстку хвилеподібну конструкцію, що характеризується вертикальним параметром $z(x)$, де x – горизонтальна складова для колії (рис. 3.1).

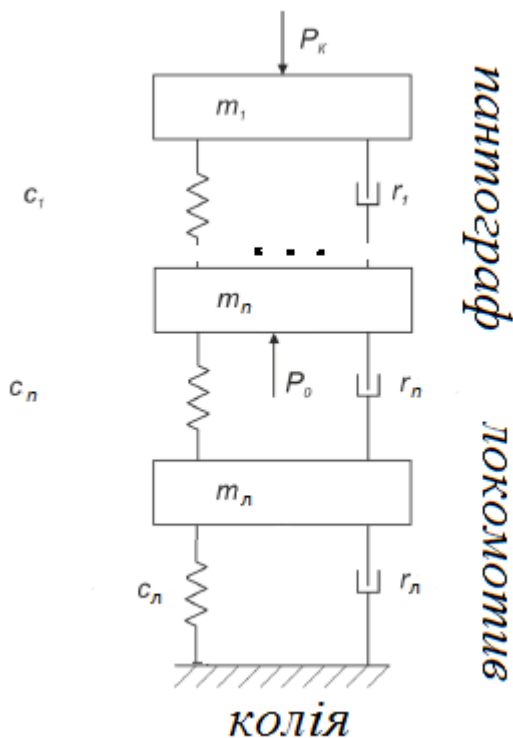


Рис. 3.1. Схематичне зображення коливальної системи – локомотив – пантограф – контактна підвіска: m_1, \dots, m_n – маси складових пантографа, m_l – маса локомотива, c_1, \dots, c_n, c_l – параметри жорсткості пружнього підвішування, r_1, \dots, r_n, r_l – дисипативні характеристики коливної системи.

Відмітимо, що в межах прийнятої моделі складові c та r вважаються не сталими, а залежними від своїх параметрів колювання:

$$c = c(z), \quad (3.1)$$

$$r = r(\dot{z}), \quad (3.2)$$

де z – параметр переміщення, $\dot{z} = \frac{dz}{d\tau}$, τ – час.

В результаті отримуємо наступну систему рівнянь:

- для локомотива:

$$m\ddot{z}_l = c_l(z_l)(z_l - z_k(x)) + r(\dot{z}_l)(\dot{z}_l) - c_n(z_n)(z_n - z_{n-1}) - r(\dot{z}_n)(\dot{z}_n - \dot{z}_{n-1}), \quad (3.3)$$

- для n -ї маси складової пантографа:

$$m\ddot{z}_n = P_0 + c_n(z_n)(z_n - z_n) + r(\dot{z}_n)(\dot{z}_n - \dot{z}_n) - c_{n-1}(z_{n-1})(z_{n-1} - z_{n-2}) - r_{n-1}(\dot{z}_{n-1})(\dot{z}_{n-1} - \dot{z}_{n-2}), \quad (3.4)$$

- для $(n-1)$ -ї маси складової пантографа:

$$m\ddot{z}_{n-1} = c_{n-2}(z_{n-2})(z_{n-2} - z_{n-1}) + r(\dot{z}_{n-2})(\dot{z}_{n-2} - \dot{z}_{n-1}) - c_{n-1}(z_{n-1})(z_{n-1} - z_n) - r_{n-1}(\dot{z}_{n-1})(\dot{z}_{n-1} - \dot{z}_n), \quad (3.5)$$

...

- для (1) -ї маси складової пантографа:

$$m\ddot{z}_1 = -P_k(x) + P_a - c_1(z_1)(z_1 - z_2) - r(\dot{z}_1)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2). \quad (3.6)$$

Тут $P_k(x)$ - сила натискання (реакції) в області контактного дроту, P_a - аеродинамічна складова роботи пантографа, x - горизонтальна координата, по якій рухається локомотив.

Дані рівняння повністю описують коливний процес локомотива та пантографа, з яких необхідно визначити контактні зусилля в області в зоні пантограф – контактний дріт.

Проаналізуємо отримані рівняння з якісної точки зору. При відсутності коливань, зокрема, у стані спокою локомотива та без врахування аеродинамічної складової навантажень пантографа, очевидно, що

$$P_k(x) = P_0. \quad (3.7)$$

Разом із тим, таке буває дуже рідко. Через динамічні процеси, зокрема, що супроводжують рух локомотива, рівняння рівноваги ($P_k(x) = P_0$) рідко забезпечується в зоні контакту.

Тоді статичне рівняння типу (3.7) перетворюється на динамічне типу (3.6), і, відповідно, і різниця значень може бути набагато більше нуля:

$$\|P_k(x) - P_0\| \gg 0. \quad (3.8)$$

за рахунок руху пантографа, аеродинамічних сил та інших складових, які виникають у поїзді під час його руху.

Апріорі приймемо, що якість струмоз'єму (як процесу) залежить від сили натиснення (контакту) в зоні пантограф – контактний дріт:

$$L = L(P_{n-d}). \quad (3.9)$$

Бажано, щоб якість струмоз'єму була в заданих межах і постійною на протязі всього часу роботи пантографа:

$$L = L(P_{n-d}) \rightarrow Optimum \rightarrow const. \quad (3.10)$$

Тобто задачу оптимізації роботи пантографа можна сформулювати наступним чином:

це пошук таких параметрів $c_1, \dots, c_n, c_l, r_1, \dots, r_n, r_l$, що задовольняють умові (3.10), а саме $L = L(P_{n-d}) \rightarrow Optimum \rightarrow const$ при заданих $P_k(x), P_a, z_k(x)$.

3.2 Аналіз моделі із позицій пошуку шляхів оптимізації роботи пантографу

Як видно, пошук оптимальних параметрів роботи пантографів, а саме оптимізація рівнянь (3.3) – (3.10) можливий за допомогою пошуку параметрів $c_1, \dots, c_n, c_l, r_1, \dots, r_n, r_l$, а також вибором зміни параметра $x = x(\tau)$, де τ - час, тобто зміною швидкості руху локомотива.

Необхідно контактне вертикальне навантаження від 95...115 Н для струмоприймачів важкого типу або 75...80 Н для струмоприймачів легкого типу (згідно розділу 2.2 даної роботи).

А в країнах ЄС статичне навантаження має бути (згідно розділу 2.1 даної роботи): від 60 Н до 90 Н для систем живлення змінного струму, від 90 Н до 120 Н для систем живлення постійного струму 3 кВ, від 70 Н до 140 Н для систем живлення постійного струму 1,5 кВ.

Зрозуміло, що одночасне забезпечувати даних умов достатньо важко.

Має бути конструктивна особливість, яка дозволяє змінювати жорсткість та в'язкість механізму пантографу, щоб забезпечувати задані параметри статичного навантаження для вимог різних систем.

Це можна, зокрема, забезпечити за рахунок пневматичних елементів із керованими параметрами перетікання повітря (керованими параметрами дросельного отвору).

3.3 Висновки.

1. Розглянуті фізичні уявлення, які необхідні для побудови математичної моделі динамічної поведінки пантографів рухомого складу.
2. Записане формулювання математичної моделі динаміки складної конструкції контактний дріт – пантограф – локомотив. Новизна побудованих співвідношень полягає у тому, що врахована залежність зміни пружних та в'язких характеристик коливної системи від параметрів переміщень та швидкості руху їх складових.
3. Сформульована оптимізаційна задача забезпечення сталості статичного контакту та якості процесу струмозйому.
4. Якісний аналіз сформульованих рівнянь дозволив запропонувати конструктивні шляхи, що мають забезпечувати сумісність жорсткості та в'язкості механізму пантографу за параметром статичного навантаження згідно вимог УЗ та залізниць країн ЄС.

4 ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУМОЗ'ЄМНИХ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ ЗГІДНО МІЖНАРОДНИХ ДОКУМЕНТІВ

4.1 Аналіз можливостей оптимізації експлуатаційних параметрів характеристик струмоз'ємних пластин

Відомо, що основним завданням струмоз'ємного пристрою – пантографа, є забезпечення якісного і безперервного струмознімання та передачі енергії до силових апаратів локомотивів.

Разом із тим, це не єдина функція пантографа, яка потребує оптимізації. Іншим, не менш важливим параметром пантографа, є забезпечення стабільного та прогнозованого зношування як контактного дроту, так і контактних пластин струмознімача.

Зрозуміло, що контактний дріт є більш пріоритетним в цій парі тертя, оскільки його важче замінювати у разі понаднормативного стоншення, але і зносостійкості контактної пластини теж має бути приділена певна увага з метою мінімізації і її зношування.

Ця задача також є важливою та відкритою, про що відмічається при аналізі міжнародних та українських нормативних документах, що подані у розділі 2 даної роботи.

На даний момент оптимізація роботи пар тертя, особливо таких критичних як контактний дріт – контактна пластина, є відкритою проблемою, через складність процесів, які проходять у зоні контактної взаємодії, використання порошкових матеріалів для контактних пластин та деякої неузгодженості в розумінні та трактуванні процесу зношування у наукових літературних джерелах, нормативних документах та інженерами практиками.

Разом з тим, ця проблема потребує вирішення, тому спробуємо запропонувати свій варіант до розв'язання цієї задачі.

При її розв'язанні будемо використовувати доступні автору відкриті джерела із дослідження проблеми тертя та зношування [20-21].

4.2 Можливості прикладної трибології при подовженні строки служби вузлів тертя

При написанні даного розділу роботи будемо використовувати літературні джерела [20-21].

Відомо, що у основі природи зовнішнього тертя лежить дисипативний процес. Динамічне контактування твердих тіл супроводжується безперервним підведенням до трибосистеми механічної енергії, її розсіювання та поглинання. Трансформація механічної енергії може здійснюватись через різні механізми внаслідок прояву дисипативних явищ. На зношування ж матеріалу витрачається порівняно мала енергія. Відповідно до першого початку термодинаміки робота тертя (без врахування механоємійних явищ) дорівнює [20]:

$$A = Q + \Delta U, \quad (4.1)$$

де Q - тепловий ефект; ΔU - зміна внутрішньої енергії трибосистеми.

Робота тертя A чисельно дорівнює механічній енергії W_m , що підводиться до трибосистеми. Тепловиділення викликається перебігом трибохімічних реакцій та динамічними явищами, що мають реологічну природу (реляксаційне, гістерезисне, мікропластичне внутрішнє тертя). Таким чином, у загальному випадку сумарний енергетичний баланс процесу тертя можна виразити так:

$$W_m = W_{ch} + W_r + W_{el}, \quad (4.2)$$

де W_{ch} - енергія, яка пішла на трибохімічні реакції; W_r - енергія, розсіяна з допомогою реологічних явищ; W_{el} - пружна енергія, запасена матеріалом поверхневого шару.

Чим більша величина енергії, що розсіюється, і менше рівень енергії запасеної, що йде на руйнування, тим вище працездатність і зносостійкість пари тертя. Іншими словами, зносостійкість матеріалу визначається

інтенсивністю захисних релаксаційних процесів, що протікають в зоні тертя, що перешкоджають накопиченню критичної енергії руйнування (запасеної енергії).

Дисипація механічної енергії відбувається переважно за реологічними механізмами, пов'язаними з проявом матеріалами непружності (в'язкопружності) та за механізмами трибохімічними, що призводять до утворення продуктів хімічних реакцій. Механоемісійні явища: люмінесценція, емісія електронів, фотоемісія, акустична емісія – характеризуються відносно низькою інтенсивністю протікання при терті та малими енерговитратами.

Більшість вузлів тертя працюють у хімічно активних середовищах (газових, рідких) та виготовляються з металів або їх сплавів, які є термодинамічно нестійкими. Це зумовлює перебіг трибохімічних реакцій, які є невід'ємною складовою процесу тертя твердих тіл. Результатом трибохімічних дисійних процесів є утворення на поверхні тертя пасивуючих плівок внаслідок реакції активних зон металу із зовнішнім газовим або рідким середовищем, що захищають основний матеріал насамперед від адгезійного зносу, а також від втомливого руйнування поверхні та від зовнішніх хімічних впливів. Трибохімічні реакції відносяться до потужних релаксаційних процесів, що сприяють дисипації механічної енергії, що підводиться до твердого тіла. Крім того, значну частину енергії окисли, що утворюються на поверхні тертя, можуть поглинати при пластичній течії.

Про визначальний вплив навколишнього середовища та топохімічних реакцій на процеси тертя та зношування металів вказується у різних роботах.

Кінетика трибохімічних реакцій відрізняється від кінетики реакцій, що порушуються термічним способом:

- у порівнянні зі нормальним нагріванням тверді тіла, піддані механічному впливу виявляються набагато реакційнішими, особливо у низкотемпературній області;

- порівняно з термічно індукованими реакціями трибохімічні реакції характеризуються іншою температурною залежністю, причому їх інтенсивність із зростанням температури може не змінюватись або навіть знижуватися;

- швидкість трибохімічних реакцій слабше залежить від тиску, ніж у разі термічних реакцій;

- рівняння класичної термодинаміки лише обмежено застосовні до трибохімічних реакцій.

Відмінною особливістю стимулювання трибохімічних процесів, в порівнянні з іншими видами реакцій, є постійне видалення з поверхні продуктів реакції - прояв ефекту свіжої поверхні, що створює умови існування слабо- або бездифузійної кінетики. В основі трибохімічної взаємодії лежить механічний процес деформації тонких поверхневих шарів, що призводить до субструктурних змін. Протікання топохімічних реакцій пов'язане з розупорядкуванням структури речовини (появою вакансій, міжзельних атомів, дислокацій, які є центрами розвитку хімічних перетворень); і рухливістю структури (рухливість точкових і лінійних дефектів, що виникають, міжзеренних кордонів і тріщин).

Зміни в субструктурі поверхневого шару та її рухливість у процесі тертя будуть визначатися як властивостями матеріалу, так і інтенсивністю механічного впливу, що виявлятиметься у зміні реакційної здатності матеріалу. Так, при низьких навантаженнях, що відповідають ділянці пружної деформації, для заліза виявлено лише незначне прискорення катодного процесу з водневою деполяризацією. Для випадку пластичної деформації спостерігається підвищення струму розчинення приблизно в 30 разів порівняно з ненавантаженим матеріалом.

Механічна навантаження сприяє підвищенню хімічного потенціалу поверхні. При цьому хімічні реакції можуть протікати між активованим твердим тілом і компонентами навколишнього середовища, так і між твердими тілами, що знаходяться в контакті, наприклад, при терті - реакції в твердих

фазах (схоплювання). Відповідно до енергетичних уявлень утворення металевих зв'язків у контакті починається від активних центрів та комплексів, природа яких зумовлена субструктурною поведінкою матеріалу.

На основі використання трибоелектрохімічних процесів розроблено енергорепараційний підхід до регенерації елементів трибосистем, що дозволяє проводити відновлення деталей у процесі зношування старіючої олії в ході експлуатації.

Хімічні реакції, що протікають в умовах динамічного силового впливу, пов'язані з процесами механічної дисипації енергії (механічної релаксації) у твердій фазі, що протікають за механізмами внутрішнього тертя. Тому очікується прояви взаємовпливу трибохімічних і реологічних процесів.

Про важливість реологічних процесів у прояві закономірностей зовнішнього тертя та зносу вказується у багатьох сучасних дослідженнях.

Так, у них вказується, що при ушкоджувальних умовах тертя "таких як пластичне протягом, тріщиноутворення, задира або відділення частинок, витрачається на це енергія повинна бути виражена властивостями міцності матеріалів", а при нормальних режимах тертя, коли "пошкодження поверхонь дуже слабо виражені, виникає спокуса назвати втрату енергії як енергію внутрішнього тертя". Однак залишається незрозумілим, як розсіюються в'язкопружні втрати. Разом з тим, яким би не було прийнято підхід до проблеми, ясно, що втрата енергії однозначно пов'язана з коливаннями елементів твердого тіла і виявляється у виділенні тепла.

Будь-який процес руйнування не можна розглядати без урахування релаксаційних ефектів, одним із проявів яких є механічні втрати: поверхневі та об'ємні. Перший тип втрат пов'язаний зі "скиданням" енергії після переходу зв'язку, що рветься через потенційний бар'єр. Другий тип втрат обумовлений непружними локальними деформаціями.

Енергетичний підхід дозволяє розробити розрахунково-експериментальну методику оцінки кінетичних та енергетико-активаційних характеристик зносостійкості матеріалів трибосполучень у діапазоні нормального механохімічного зношування. При цьому за інтегральний структурно-енергетичний критерій зносостійкості конструкційних матеріалів прийнята енергія активації поверх руйнування, фізичний сенс якої аналогічний фізичному сенсу енергії активації хімічних реакцій.

Аналітичний аналіз розсіювання енергії в режимі попереднього змішування свідчить про наявність взаємозв'язку дисипативних процесів із зміною характеристик матеріалу та зовнішніх умов тертя.

Реологічні властивості фрикційного контакту вперше було розглянуто І.В. Крагельським на моделі так званого "третього тіла", під яким мається на увазі деякий обсяг матеріалу, що має в'язкопружні властивості. У цьому обсязі зосереджується як сама взаємодія тіл при терті, так і наслідки такої взаємодії. Реологія, як теорія в'язкопружності (узагальнення теорії пружності та гідродинаміки в'язкої рідини), є аналітичною основою при описі різних видів деформації та плинності речовин залежно від напруг, що створюються в них. При цьому розглядаються реологічні рівняння, що зв'язують напруги та деформації з їх похідними за часом. Методи реології застосовуються в описах явищ релаксації напруг, внутрішнього тертя, повзучості, пружного післядії тощо, явищ, які практично завжди мають місце і металеві деталі незалежно від способу створення напруженого стану.

Релаксація напружень, як і будь-який інший процес перебігу пружно-в'язкої речовини (наприклад, повзучість), знаходиться в тісному зв'язку з внутрішнім тертям. Внутрішнє тертя обумовлено непружними явищами і характеризує здатність твердого тіла розсіювати механічну енергію, що підводиться до нього при дії циклічного (динамічного) навантаження, переводячи її і теплоту.

За останні десятиліття на базі дослідження внутрішнього тертя значний розвиток набула мікрореологія твердих тіл (метали, полімери), яка дозволяє перейти від формалізованого, феноменологічного опису реологічних явищ до розгляду конкретних фізичних мікромеханізмів таких явищ. Тому з огляду на те, що внутрішнє тертя має загальну фізичну природу з релаксаційними явищами в твердих тілах при впливі динамічного навантаження, стало можливим говорити про різноманіття мікромеханізмів релаксації напруги залежно від конкретних навантажувально-швидкісних і температурних умов навантаження і природи матеріалу.

Контакт твердих тіл дискретний і складається із системи окремих ділянок безпосереднього дотику. При терті відбувається пружно-пластичне деформування мікронерівностей поверхні, яке формує хвилю деформації напруги, що поширюється в активному шарі матеріалу. Характеристики хвильового фронту (амплітуда напруги, частота) залежать від характеру ударно-деформаційних процесів на мікроконтактах.

Початкове розсіювання енергії насамперед відбувається внаслідок імпульсної пластичної деформації плям фактичного контакту, що супроводжується значним підвищенням температури в зоні тертя з локалізацією зсуву в поверхневому шарі (адіабатичний зсув).

Інший вид розсіювання механічної енергії виникає в елементах пари тертя за рахунок недосконалої пружності контактуючих матеріалів при поширенні в них деформацій хвиль, що генеруються в зоні дискретного фрикційного контакту. Механізми цього виду дисипації енергії різноманітні й у умовах циклічного чи імпульсного навантаження описуються у термінах внутрішнього тертя, що одна із основних реологічних характеристик поведінки металів за умов динамічного навантаження. Наявність в трибосистемі джерел розсіювання енергії, що працюють за механізмами внутрішнього тертя, є важливим фактором зниження динамічної напруженості поверхонь, що труться.

При терті твердих тіл руйнація починається в місцях локальної концентрації напруги, пов'язаної з деформаційною або температурною неоднорідностями. Найбільш сприятливий напружено-деформований стан у зонах дискретного контакту досягається тоді, коли контактне навантаження розподіляється більш рівномірно, відсутні місцеві пікові напруги, а процеси деформації зберігають однорідність та поверхневу локалізацію. Отже, зносостійкість трибосистеми має бути з реологічними властивостями її елементів.

Враховуючи, що внутрішнє тертя (що відображає динамічні механізми релаксації напружень) різко знижує напруги від імпульсів або ударів, що супроводжують зовнішнє тертя, згладжує динамічні напруги в місцях їх концентрації, проблема мінімізації зносу в ряді випадків зводиться до забезпечення високого внутрішнього тертя контактуючих матеріалів при заданих навантаженням, швидкісних та температурних умовах контактної взаємодії. Звідси, зокрема, впливає, що одні вторинні структури не можуть захищати метал від зносу; вони можуть бути афективними лише тоді, коли формуються на металі-підкладці зі сприятливими властивостями.

Залежно від природи матеріалів та умов зовнішнього тертя будуть реалізовані ті чи інші механізми дисипації механічної енергії, з яких найбільш ефективними є релаксаційне (амплітудонезалежне), гістерезисне та мікропластичне (амплітудозалежне) внутрішнє тертя.

До механізмів релаксаційного внутрішнього тертя відносяться: термопружна, магнітопружна та дислокаційна релаксація. Ці види релаксації обумовлені тепловою, магнітною та атомною перебудовою при дії щодо невеликих амплітуд деформації, формуючи так зване тло внутрішнього тертя. На фон внутрішнього тертя при певних температурно-частотних параметрах механічних коливань накладаються релаксаційні максимуми внутрішнього тертя: пік Сноєка (дифузія атомів впровадження в полі діючих напруг у металах з ОЦК-решіткою), пік Фількенштейна-Розіна (дифузія металах), пік Зінера

(дифузія у твердих розчинах заміщення), деформаційний пік Кестера (взаємодія дислокацій з атомами домішок), зернограничний пік. У температурних діапазонах фазових переходів з'являються максимуми структурної релаксації. Рівень внутрішнього тертя має тим вище рівень, чим більше загальна метастабільність стану матеріалу, найчастіше викликана дефектами кристалічної будови, що спотворюють кристалічну структуру. Всі релаксаційні процеси, що призводять до стабілізації структури та знижують загальний рівень вільної енергії системи, зменшують фон внутрішнього тертя. Наприклад, метастабільна структура може бути отримана при мартенситному перетворенні, тому у свіжозгартованих сталях спостерігається високий рівень внутрішнього тертя.

Зі збільшенням амплітуди деформації реалізується гістерезисне внутрішнє тертя. Розрізняють оборотні та незворотні гістерезисні явища. До оборотної гістерези відноситься оборотний рух лінійних і поверхневих дефектів субструктури. До незворотних відносяться дислокаційний гістерезис, зумовлений відривом дислокації від точок закріплення, та магнітомеханічний гістерезис у феромагнетиках та антиферомагнетиках (рух кордонів магнітних доменів).

При значних амплітудах деформації виникає мікропластичне внутрішнє тертя (з утворенням нових структурних дефектів), рівень якого може досягати досить високих значень. До джерел дисипації енергії слід також віднести процеси утворення та розвитку нових поверхонь розділу (релаксаційних мікротріщин).

Не всяке зростання внутрішнього тертя адекватне підвищенню зносостійкості. Чим більша частка механічної енергії, що підводиться при терті, розсіюється по неушкоджуючих (захисних) механізмах, тим вище зносостійкість пари тертя. У відсутність або при вичерпанні неушкоджуваних джерел релаксації пікових напруг у локальних обсягах виникають крихкі релаксаційні тріщини або настає схоплювання, яке можна розглядати як один з

різновидів структурної релаксації, що виникає у твердій фазі на межі розділу.

Баланс внутрішнього розсіювання енергії хвильового фронту з допомогою реологічних ефектів буде дуже динамічним. Частотний та амплітудний параметри хвильового фронту, створюваного динамічним контактуванням поверхонь, властивості складових гетерогенний матеріал фаз, а також температура є факторами, що визначають механізм розсіювання, що діє. Сучасні фізичні експериментальні методики дають можливість визначати параметри непружності матеріалу та їх зміну під впливом температурно-силових умов. У цьому випадку відкривається перспектива оцінки енергорозсіювальних властивостей матеріалу за механізмами внутрішнього тертя та прогнозування зносостійкості.

Таким чином, сутність трибопроцесів полягає в тому, що вони протікають в умовах імпульсного силового впливу і супроводжуються розсіюванням механічної енергії, що підводиться. Існує два основних канали незворотної дисипації механічної енергії в ході тертя: трибохімічний та реологічний, прояв яких визначається низкою факторів: властивостями навколишнього середовища, параметрами зовнішнього навантаження та природою пари тертя. Частки розсіяної та запасеної енергії поверхневим активним шаром зумовлюватимуть кінетику накопичення пошкоджень та руйнування.

Розглянемо тепер «інженерні трибологічні методи», що стали вже «класичними» при подовженні строків служби контактних пар. Цитування будемо проводити на основі літературного джерела [21, 22].

Конструктивні способи підвищення довговічності і надійності робіт деталей, що труться, дуже різноманітні і вирішуються конструктором на стадії проектування вузлів тертя.

Основними завданнями у цьому плані є:

- оцінка та вибір схем вузла тертя машини з позиції впливу її на зносостійкість та надійність конструкції;
- вибір матеріалів пари тертя;

- призначення розмірів та форми деталей;
- забезпечення нормальної роботи вузла тертя у заданому режимі та захист від перевантажень;
- забезпечення експлуатації із мінімальними витратами;
- захист вузла тертя від аварійних ушкоджень

Розглянемо деякі із цих завдань докладніше.

Оцінка та вибір схеми вузла тертя

Для пари, утвореної поверхнями тертя, що мають різні твердість та розміри, можна виділити дві умови:

- 1) $H_1 > H_2; S_1 < S_2;$
- 2) $H_1 < H_2; S_1 < S_2,$

де H_1, H_2 – твердості поверхонь тертя; S_1, S_2 – відповідні площі поверхонь.

Пару з розташуванням матеріалів, що задовольняє першу умову, називають прямою парою тертя, а задовольняє другий умові - зворотною парою. У разі прямої пари тертя по більшій поверхні ковзає твердіше тіло, а у випадку зворотної пари - м'якше тіло. Прикладами прямої пари є ковзання загартованого супорта по чавунній термічно не обробленій станині та ковзання хромованого поршневого кільця по поверхні циліндра з перлітного чавуну. Зворотною парою буде хромоване робоче дзеркало циліндра та чавунне кільце. Вал і підшипник з бабітовим шаром при навантаженні постійного напрямку, прикладеного до валу, що обертається, являють собою зворотну пару.

Щоб визначити, яка пара тертя - пряма або зворотна краще для даної конструкції, слід встановити вимоги до пари щодо надійності її роботи, зносостійкості, економічності та умов експлуатації.

Недостатня надійність пари тертя у зв'язку з невідповідним підбором матеріалів може виразитися у схоплюванні та заїданні. Досвід експлуатації машин, стендові випробування деталей, що труться, і лабораторні дослідження показують, що зворотні пари тертя більш стійкі до заїдання, а за наявності заїдання мають менші пошкодження поверхонь.

Відмінність у роботі прямих та зворотних пар тертя полягає в наступному. У прямій парі при перевантаженні пластична деформація її елемента з меншою твердістю перешкоджає нормальній роботі пари, внаслідок чого зростають сили тертя, збільшується пошкодження поверхні, і пара швидко виходить з ладу. У зворотній парі під час перевантаження пластична деформація зразка з меншою твердістю не перешкоджає роботі пари.

На довговічність та надійність роботи вузлів тертя сприятливий вплив має жорсткість, податливість та спеціальна конфігурація деталей.

Податливість деталі: загальна або місцева, дозволяє її робочій поверхні слідувати за деформацією сполученої деталі та пристосовуватися до неточностей її геометричної форми. Самовстановлюючий опорний підшипник є найпростішим прикладом конструкції, що має деталь вільної податливості у вигляді вкладиша, що має кутову рухливість. Повніше роль податливості проявляється у гумометалевих вкладишах та гумованих деталях, у вкладишах із пластмас та м'яких покриттях робочих поверхонь.

Суха гума має коефіцієнт тертя вище, ніж в інших матеріалів, і в той же час у парі зі сталлю, бронзою та латунню при змащуванні такою малов'язкою рідиною, як вода, має високі антифрикційні властивості. Це пояснюється тим, що гнучка гумка, що легко деформується, добре пристосовується до нерівностей поверхні валу без порушення в зоні навантаження безперервності мастильного шару. Останній завдяки цьому для збереження режиму при рідинному мастиллі може бути меншою товщиною, ніж при металевій поверхні вкладиша. Висока здатність деформації гуми зумовлює більш рівномірний розподіл тиску довжиною вкладиша. Абразивні частинки, що містяться у воді, вминаються в м'яку поверхню гуми, перекочуються по ній, не роблячи ріжучої дії, і виносяться з водою в мастильну канавку. За наявності піску, мулу та бруду в змащувальній та охолодній підшипник воді вкладиш виготовляють з великою кількістю канавок і підбирають гуму з високою зносостійкістю. Резинометалеві вкладиші встановлюють у відповідних пристроях морських та річкових суден, у

відцентрових піскових насосах, артезіанських насосах, гідравлічних турбінах, турбобурах тощо.

Аналогічно гумі поводяться м'які покриття вкладишів, податливість яких обумовлена малим опором пластичної деформації. У пластмас, подібно до гуми, відповідно до їх модулів пружності, а у термопластичних пластмас ще й внаслідок їх розм'якшення навантаження по довжині вкладиша розподіляється рівномірніше, ніж у металів.

З іншого боку, для деяких вузлів тертя підвищенню зносостійкості сприяє збільшення жорсткості конструкції. Приклад, чим рівномірніше розподілено навантаження по довжині зуба зубчастих передач, тим вище їх здатність навантаження. Неточність виготовлення та складання деталей передачі, вигин та кручення валів у процесі роботи сприяє нерівномірному розподілу навантаження. Тому збільшення жорсткості валів, опор і корпусів є сприятливим чинником підвищення працездатності виробів.

Питання вибору матеріалів пари тертя є на даний час відкритим. Разом із тим, виконання вимог загальної та контактної міцності, жорсткості чи податливості деталей, їх зносостійкості, корозійної стійкості, вібростійкості тощо забезпечується правильним вибором матеріалів, призначенням розмірів, виходячи з розрахунків на міцність, вибором раціональних конструктивних форм деталей та відповідної технології виготовлення. Вибір матеріалу, що повністю відповідає умові роботи деталей, є дуже складним завданням.

Залежно від призначення деталі, що труться, виготовляють з конструкційних, фрикційних, зносостійких і антифрикційних матеріалів широкої номенклатури.

З конструкційних сталей виготовляють деталі, які повинні мати високу міцність, жорсткість або податливість. До таких деталей відносяться вали, пальці, болти шарнірів, зубчасті колеса та ін.

Фрикційні матеріали – це матеріали, які в контакті з металевими поверхнями мають високий та стабільний коефіцієнт тертя. Застосовуються такі матеріали в гальмах та фрикційних муфтах.

Зносостійкі називають матеріали, які при терті у важких умовах роботи зношуються порівняно мало.

Всі пари тертя повинні мати антифрикційність, під якою розуміють комплекс наступних властивостей: достатня статична і динамічна міцність при підвищених температурах; здатність утворювати міцний граничний шар мастильного матеріалу та швидко відновлювати його при руйнуванні; низький коефіцієнт тертя; відсутність заїдання на валу під час перерви мастила; високі теплопровідність; теплоємність; гарна зносостійкість; не дефіцитність та технологічність.

Підшипникових матеріалів, які відповідають усім цим вимогам, на даний момент немає [22]. Так, наприклад, міцність бабітів із високим вмістом олова різко знижується з підвищенням температури; прироблюваність безолов'янистих бронз незадовільна. Неметалічні антифрикційні матеріали мають низьку теплопровідність. Кожен із підшипникових матеріалів антифрикційний у певних режимах тертя. Про антифрикційність будь-якого матеріалу судять за його коефіцієнтом тертя зі сполученою деталлю, порівняно з іншими матеріалами за аналогічних умов випробувань, за обсягом пошкоджень поверхонь тертя, температури цих поверхонь і т.п.

Важко відокремити антифрикційні матеріали від зносостійких, оскільки зносостійкість є загальною вимогою для всіх матеріалів, у тому числі фрикційних. При підборі матеріалів з високою зносостійкістю завжди неявно мають на увазі антифрикційність.

Вибір матеріалів при конструюванні вузлів тертя представляє важке завдання, оскільки залежить від конструкції та призначення вузлів, технології виробництва, умов експлуатації, вимог до терміну їхньої служби та надійності з урахуванням вартості матеріалів та експлуатаційних витрат.

На вибір матеріалів можуть вплинути фізико-механічні явища на поверхнях тертя, що залежать від умови роботи. Наприклад, високомарганцевиста сталь (сталь Гатфільда), з якої виготовляють щоки дробарок, броньові плити кульових млинів, вирви для приймання шихти та ін. Деталі має аустенітну структуру з наявністю мартенситу та включень карбідів.

При великих тисках і ударах сталь схильна до наклепу, який тим більше, чим вище питоме навантаження, при цьому твердість поверхні підвищується до HB 5000. Однак в умовах абразивного зношування ця сталь зношується навіть швидше, ніж середньовуглецева.

При одних і тих же хімічному складі та механічних властивостях матеріали можуть суттєво відрізнятися за зносостійкістю через відмінність структур. Крупнозернисті сплави, наприклад, легко приробляються і пластичніші, але менш зносостійкі. Наявність у структурі твердих або великих м'яких складових, що легко викришуються, часто призводить до схоплювання поверхонь тертя. Великі карбіди в чавунах сприяють утворенню сітки термічних тріщин під час роботи деталей.

Складність завдання підбору раціональної структури матеріалу можна показати підшипникових сплавах.

Основну вимогу до структури антифрикційних сплавів було вперше сформульовано 1897 р. Шарпі. Згідно з правилом Шарпі антифрикційні сплави, що добре працюють, повинні мати рівномірно розподілені в пластичній матриці (основі) тверді зерна з низьким коефіцієнтом тертя і малою схильністю до задирів. Свого часу всі підшипникові сплави задовольняли це правило (бабіти, олов'яні бронзи). Однак у подальшому були розроблені сплави з м'якими включеннями у твердій матриці (свинцева бронза), однорідні антифрикційні матеріали та ін.

Для виготовлення деталей вузлів тертя нині використовують дуже багато різних матеріалів. Найбільш широко використовують сплави заліза, сплави із кольорових металів, порошкові та синтетичні матеріали.

Підшипниковими матеріалами на основі заліза є графітована сталь та перлітні чавун: сірі (АЧС) з пластичним графітом, високоміцні (АЧВ) з глобулярним графітом, ковкі (АЧК) з пластівцевим графітом та медисті чавуни. Ці матеріали мають високу твердість (НВ 1600-2500), погано приробляються і схильні до заїдання.

До сплавів із кольорових матеріалів відносять бронзи, бабіти, алюмінієві сплави.

Бронзи застосовують для підшипників, що працюють при великих швидкостях та питомих навантаженнях. Найбільш поширені олов'яні (БРО, БРОФ), олов'яно-свинцеві та олов'яно-цинково-свинцеві (БРОЦС). Для економії олова розроблені безолов'яні бронзи (БРАЖ, БРАЖМ та ін), які мають гірші антифрикційні властивості.

Високоолов'яні матеріали, що містять Pb, Cu, Al, в яких пластичній матриці знаходяться тверді складові, називають бабітами. Їх заливають на вкладиші за температури 450-480°C товщиною 0,25...3,0 мм. Бабіти мають найвищі антифрикційні властивості та добре приробляються.

Для невідповідних підшипників застосовують сплави з алюмінію та кремнію (АЛ2, АЛ4), алюмінію та магнію (АЛ8), алюмінію та міді (АЛ10, АЛ18). При виборі проміжків у підшипнику необхідно враховувати високий коефіцієнт термічного розширення алюмінієвих сплавів.

Зі сплавів на цинковій основі знаходить застосування ЦАМ, що містить як легуючі добавки алюміній, мідь і магній.

Порошкові антифрикційні матеріали отримують шляхом змішування пресування та спікання заготовок із порошоків заліза, бронзи, графіту.

Після спікання в матеріалі залишаються пори які використовуються як резервуар мастила. При нагріванні за рахунок тертя масло виходить з пір і утворює суцільну плівку на поверхні контакту, при цьому витрата мастила в 10 разів менша, порівняно з витратою в бронзових підшипниках.

Пористість підшипника визначає величину припустимого навантаження на нього. Для звичайних умов роботи підшипника пористість має бути в межах 18...25%. Для малонавантажених підшипників застосовують залізографітні порошкові матеріали з різним вмістом графіту. Найчастіше використовують порошкові бронзографіти. Введення у порошкові матеріали різних добавок дозволяє цілеспрямовано регулювати властивості. При створенні порошкових антифрикційних матеріалів можна застосовувати металізовані порошки твердих мастил та твердих включень як багатофункціональні добавки.

Пластмаси в якості антифрикційних матеріалів застосовують завдяки їх перевагам: невисокий коефіцієнт тертя, хороша продуктивність, висока корозійна стійкість, безшумність в роботі і т.п. Однак водночас пластмаси мають і негативні якості: низьку теплопровідність, набухання в рідинах, високу податливість, старіння.

Найбільше застосування з пластмас у вузлах тертя знаходять: поліаміди (добре працюють у парі із загартованою сталлю, питомого навантаження не вище 5 МПа), вініпласт та поліетилен (застосовні для невеликих навантажень), фотопласт-4 (широко застосовується у хімічному машинобудуванні через високу інтенсивності практично по всіх рідинах і газах), армовані нейлони та полікарбонати, текстоліти та композиції на основі епоксидних смол.

Для роботи без мастила в широкому діапазоні температур розроблений і широко застосовується металопластмасовий стрічковий матеріал, що складається зі сталеві стрічки (підкладки), на яку напікається бронзовий сферичний порошок з подальшим просоченням пористого бронзового шару фторопластом.

Для роботи при високих температурах використовують тугоплавкі метали, спеціальні та тверді сплави, керамічні матеріали з різними мастильними матеріалами (графіт, дисульфід молібдену, оксиди свинцю та бору).

Перевірку правильності вибору матеріалів пар тертя ковзання при заданих або прийнятих розмірах деталей, що сполучаються, і визначення цих розмірів

при проектному розрахунку проводять за деякими критеріями. Найбільш простий спосіб перевірки полягає в розрахунку за середнім тиском пар.

Спосіб придатний для пар тертя, що працюють з малими швидкостями ковзання при невисоких температурах навколишнього середовища, і має на меті забезпечити зчленування від можливого заїдання.

Якщо режим тертя пари визначається як тиском, а й швидкістю ковзання v , то застосовують прийнятий у конструкторській практиці розрахунок за величиною pv . Ідея методу полягає в наступному: якщо f - коефіцієнт тертя ковзання, то fpv є питомою потужністю тертя. Оскільки надійна робота підшипника, гальма або іншого вузла можлива лише за теплонапруженості, що не перевищує певну величину для даної конструкції та умов її експлуатації, то умову надійності підшипника по теплонапруженості можна записати: $fpv < A$, де A - гранична кількість теплоти в механічних одиницях, яка може відводитися з одиниці площі діаметральної проекції підшипника за одиницю часу. Приймавши f постійним, отримаємо цю умову як $pv = \text{const}$.

Хоча допустиме значення параметра pv підбирають при цьому залежно від швидкості ковзання, способу тепловідведення, характеру дії навантаження та інших умов, проте використання цього твору як показника працездатності не завжди є виправданим. Ця теорія розрахунку приймає коефіцієнт тертя постійним і враховує ролі відносного діаметрального зазору в підшипнику, відношення довжини шипа до його діаметру і вплив в'язкості мастильного матеріалу. Тим не менш, якщо підшипник або інша пара працює при граничному мастилi, то розрахунок по pv є виправданим, оскільки цей параметр побічно характеризує температуру поверхні тертя, яка у явному вигляді не входить до числа заданих при розрахунку величин. Додатково слід лімітувати $[p]$. В інженерній практиці обидва розрахункові критерії $[p]$ і $[pv]$ часто використовують спільно.

Підбір найбільш відповідних матеріалів для пар тертя ковзання можна в кожному окремому випадку зробити тільки на підставі ретельного зіставлення

умов роботи деталей, що труться, вихідних властивостей матеріалів і тих змін, які вони зазнають на поверхнях тертя, а також при обліку інших обставин.

Навівши достатньо великий аналіз, що поданий вище, спробуємо сформулювати деякі правила підбору матеріалів [20-22]:

1 Поєднувати твердий матеріал з м'яким, що має температуру рекристалізації нижче середньої температури поверхні тертя при роботі. При такому поєднанні метали добре протистоять заїданню та характеризуються високою надійністю. Хороші результати дають, пари хром – гума при змащуванні мінеральним маслом та водою та хром – бронза при використанні пластичних мастильних матеріалів.

2 Поєднувати твердий метал з твердим (поєднання пар із азотованої, хромованої та загартованих сталей). Такі пари тертя мають високу зносостійкість внаслідок малого взаємного впровадження їх поверхонь. Нанесення покриттів для підробітку підвищує надійність пар в найбільш небезпечний період роботи - під час приробітку. Застосування цих пар обмежується швидкостями ковзання. Висока точність виготовлення та складання, значна жорсткість конструкції, ретельний доробок, поліпшення умов змащування значно розширюють область застосування пар тертя з твердих матеріалів.

3 Уникати поєднань м'якого матеріалу з м'яким, а також пар з однойменних матеріалів (незагартована сталь по загартованій сталі, алюмінієвий сплав по алюмінієвому, мідний сплав по алюмінієвому, хром по хрому, нікель по нікелю, пластмаса по пластмасі), за винятком пар з політетрафторелену . Подібні пари мають низьку зносостійкість і ненадійні у роботі. При незначних навантаженнях у парах утворюються вогнища схоплювання і відбувається глибинне виривання матеріалів із взаємним їх налипанням на поверхні тертя.

4 Застосовувати у важкодоступних для змащування конструкціях пористі, порошкові матеріали та антифрикційні сплави.

5 Застосовувати як фрикційні та антифрикційні матеріали пластичні маси. У ряді випадків вони підвищують надійність та термін служби вузла тертя, знижують масу конструкції та витрату дефіцитних кольорових металів, зменшують вібрації та покращують акустичні властивості машин.

6 Прагнути шляхом вибору матеріалів пари тертя, мастильних матеріалів та присадок до них створювати під час роботи пари умови реалізації режиму виборчого перенесення.

7 Враховувати можливість при експлуатації насичення воднем поверхонь тертя, що різко знижує зносостійкість та надійність роботи вузла тертя. Застосовувати матеріали, що важко піддаються насиченню воднем.

8 Сталеві деталі вузлів тертя під час остаточного доведення їх поверхні піддавати фінішній антифрикційній обробці.

9 Створювати матеріали, які за рахунок внутрішньої структури дозволяють «розсіювати поверхневий напружений стан» вглиб матеріалу, частково перетворюючи зовнішнє тертя на внутрішнє.

4.3. Розробка підходів щодо підвищення експлуатаційних параметрів контактних пластин

Матеріали пункту 4.3 даного розділу роботи будемо формувати на базі статті [23], автором якої є керівник даної дипломної роботи. За консультації щодо використання підходів нелокальної та технологічної механіки при оптимізації експлуатаційних параметрів струмоприймачів автор роботи вдячний своєму керівнику.

Відомо, що зношування проводу та контактних пластин пантографів супроводжується складними та взаємопов'язаними процесами при контакті ковзання, через який і здійснюється передача електричної енергії.

На даний момент, згідно робіт школи Крагельського І.В., умовно зношування можна поділити на електричне і механічне. Електричне

викликається ерозією контактних елементів, тобто викидом та випаровуванням складових сплавів під впливом іскрових і дугових розрядів. Механічне зношування, яке реалізується в умовах тертя за абразивним, окислювальним, втомним та/ або адгезійним механізмами, залежить від властивостей матеріалів проводу і пластини, а також напружено-деформованого стану в області контактної взаємодії.

Таке розділення має досить умовний характер через те, що електрична і механічна складові зношування є пов'язані і взаємозалежні. Так відомо, що електричні розряди можуть викликати пошкодження контактуючих поверхонь, які збільшують механічне зношування. Через це схоплення та задири поверхонь не тільки збільшують механічне зношування, але і порушують стабільність контакту в результаті чого підвищується електрична ерозія. Тому зниження механічної складової зношування є важливим для контактних пластин.

Головним постулатом сучасних підходів у трибології є те, що при терті контакт тіл відбувається в локальних мікроб'ємах – плямах контакту, в області яких розвиваються поверхневі дефекти та їх потоки, що суттєво впливають на характеристики матеріалів, процеси їх деформації та руйнування [22, 19].

Відомо, що контактні пластини струмоприймачів виготовляють з матеріалів на основі графіту і металів методом порошкової металургії, що дозволяє зменшувати зношування контактного проводу.

На даний час моделі механіки деформівного твердого тіла, які описують еволюцію механічних і структурних параметрів матеріалів в процесі деформування, мають в своїй основі представлення деформованого тіла як деякого однорідного середовища, що складається із двох взаємодіючих континуумів – матеріального і дефектів (тут можна зробити посилання на праці школи академіка СРСР Паніна В.Є., але в даній роботі ми цього праці наводити не будемо, щоб не ускладнювати викладення матеріалу).

Покращення функціонування фрикційної пари «струмоприймач – контактний провід» вимагає розробки «нових матеріалів» (або оптимізації

структури «старих») для виготовлення контактних пластин, детального аналізу ролі параметрів структури матеріалів в процесах їх руйнування.

Згідно сучасних робіт із трибології [20, 21], а також статей керівника цієї дипломної роботи, час оптимізація технологічних режимів виготовлення пластин не може ґрунтуватися лише на результатах визначення стандартних механічних властивостей при випробуваннях на розтяг, стиск і удар та вимагає використання комплексу фізичних методів досліджень, а також підходів «некласичної» механіки для встановлення структурних одиниць, які відповідають за поведінку виробів при експлуатації.

Досліджували контактні пластини, виготовлені методом порошкової металургії із порошоків заліза, міді, графіту та сплаву на основі олова з розмірами часточок відповідно 180...210 мкм, 50-60 мкм, 5...6 мкм та 220...250 мкм. Вихідні матеріали після зважування, змочування перемішували і пропускали через сито для запобігання злипанню часточок. Після зважування суміш засипали у прес-форму, піддавали вібраційній обробці для рівномірного розподілу складових і пресували із зусиллям 10 МН. Отримані заготовки спікали в контейнері в середовищі деревинного вугілля і охолоджували з піччю. У результаті отримували заготовки, в яких відбувалося жолоблення. Для його усунення проводили рихтування на пресі, яке забезпечувало також і підвищення твердості заготовок.

Після рихтування заготовки просочували в суміші парафіну та солярки. Загальний вигляд пластин струмоприймачів показано на рис. 4.1.

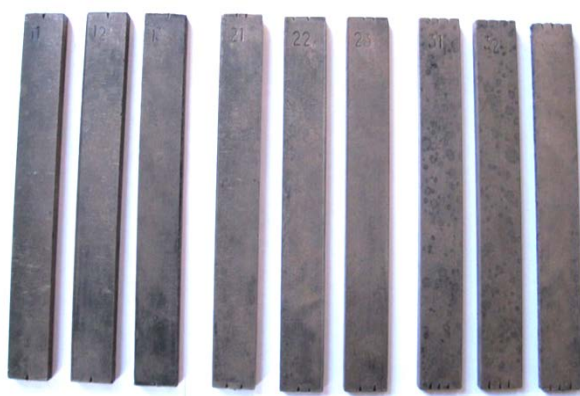


Рис. 4.1 Пластини струмоприймачів електровозів, виготовлені методом порошкової металургії (загальний вигляд).

Хімічний склад досліджених пластин, режими обробки тиском і значення електричного опору показані в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Хімічний склад і питомий електроопір пластин струмоприймачів електровозів, виготовлених методом порошкової металургії

№ пластины	Хімічний склад пластины, ваг %	Тиск рихтування, МПа	Питомий електроопір ρ , Ом·м
1.1	Fe – 72,10	12,1	$82,500 \cdot 10^{-8}$
1.2	Cu – 26,90 Sn – 0,54	19,2	$88,347 \cdot 10^{-8}$
1.3	C – 0,46	27,3	$91,348 \cdot 10^{-8}$
2.1	Fe – 65,08 Cu – 30,68	12,1	$83,985 \cdot 10^{-8}$
2.2	Sn – 3,79 C – 0,45	19,2	$88,7133 \cdot 10^{-8}$
2.3		27,3	$103,203 \cdot 10^{-8}$
3.1	Fe – 60,11 Cu – 35,20	12,1	$70,351 \cdot 10^{-8}$
3.2	Sn – 4,24	19,2	$75,494 \cdot 10^{-8}$
3.3	C – 0,45	27,3	$78,757 \cdot 10^{-8}$

Вимірювання електроопору виявили, що його значення змінюється від $70,351 \cdot 10^{-8}$ Ом·м до $103,203 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. При збільшенні тиску рихтування електроопір зростає для всіх досліджених сплавів.

Для вивчення локального порушення суцільності сплавів, яке формується в умовах технологічних обробок, оцінювали опір сплавів місцевій пластичній деформації шляхом розклинювання матеріалу індектором прилада для вимірювання твердості. Параметром, який інтегрально характеризує структурний стан матеріалу при обробці результатів масових вимірювань, є гомогенність структури [24].

Встановлено, що великим значенням коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m), який відображає ступінь розсіяння характеристик твердості, відповідає

краща «організація структури», а також низький ступінь пошкоджуваності, меншим значенням навпаки вищий рівень пошкоджуваності.

Оцінку ступеню пошкоджуваності сплавів проводили за результатами вимірювань твердості методом Роквелла, кулькою діаметром $3,175 \cdot 10^{-3}$ м, при навантаженні 588,4 Н.

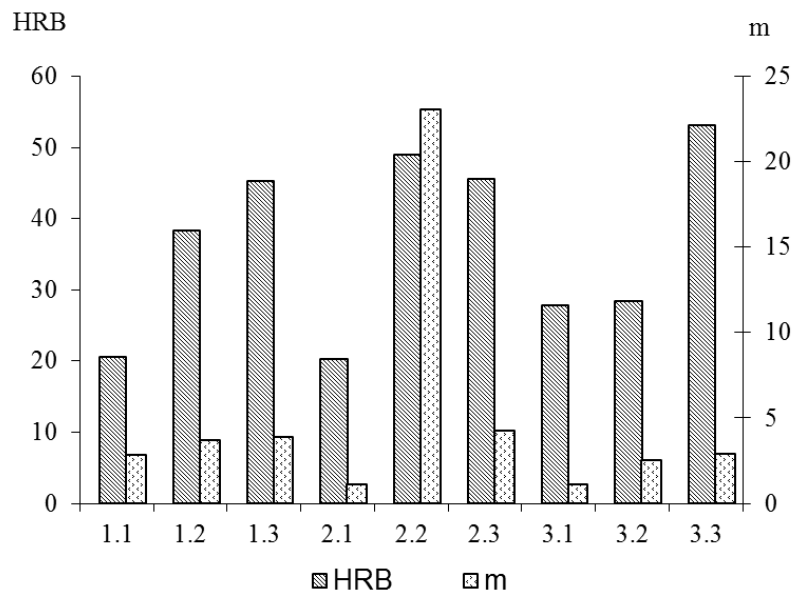


Рис. 4.2. Твердість (HRB) і коефіцієнт Вейбулла (m) порошкових пластин струмоприймачів електровозів визначені по розтягнутій стороні заготовок із сплавів 1, 2, 3 після їх рихтування

Аналіз результатів вимірювання твердості і розрахунку коефіцієнту розподілу Вейбулла, які визначені по розтягнутій стороні досліджуваних пластин (рис. 4.2), показав, що для сплавів 1 і 3 зі збільшенням тиску рихтування коефіцієнт гомогенності (m) зростає, що свідчить про зменшення рівня пошкоджуваності. Для сплаву 2 є характерним найбільше значення коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) після тиску 19,2 МПа.

Проводили також визначення твердості і коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) на стиснутій стороні заготовок після жолоблення (рис. 4.3).

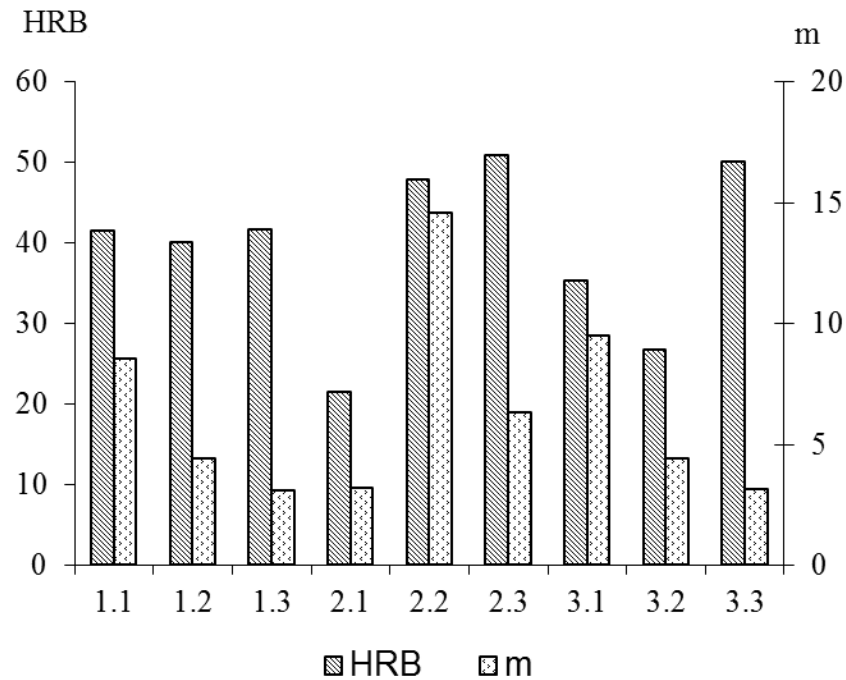


Рис. 4.3 Твердість (HRB) і коефіцієнт Вейбулла (m) порошкових пластин струмоприймачів електровозів, визначені по стиснутій стороні заготовок із сплавів 1, 2, 3 після їх рихтування.

Для сплавів 1 і 3 з підвищенням тиску рихтування коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) зменшується, що свідчить про більшу пошкоджуваність при отриманні пластини. Звідси можна зробити висновок, що підвищення тиску не завжди добре для отримання пластин із «оптимальною структурою».

Найбільше значення (m) по стиснутій стороні досягається для сплаву 2 після навантаження 19,2 МПа.

У заготовках пластин, що отримані методом порошкової металургії, присутні технологічні пошкодження (пори), які перетворюються в тріщини при дії зовнішнього фрикційного контактного навантаження. Збільшення кількості пор, яке фіксується характеристиками розсіяння твердості, зменшує опір сплавів до руйнування.

Важливе значення для пластин струмознімачів електровозів має їх зносостійкість в умовах тертя ковзання при контактній взаємодії з мідним проводом. В роботі [23] проводили випробування на зношування, де в якості

тіла використовували зразки, виготовлені із досліджуваних пластин, а в якості контртіла – мідний циліндр.

Випробування проводили при навантаженні 80 Н та швидкості обертання контртіла 6 об/хв. Така схема випробувань виключила можливість нагрівання елементів пари тертя. Інтенсивність зношування оцінювали за втратою маси зразків, після зношування протягом однієї години. Результати дослідження представлені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Втрата маси зразків при зношуванні і коефіцієнт гомогенності Вейбулла по розтягнутій стороні заготовок після спікання

№ пластини	Втрата маси, 10^{-3} кг	Коефіцієнт гомогенності Вейбулла
1.1	0,0039	2,87
1.2	0,0024	3,74
1.3	0,0028	3,89
2.1	0,0028	1,10
2.2	0,0024	23,11
2.3	0,0026	24,27
3.1	0,0043	1,11
3.2	0,0039	2,54
3.3	0,0020	2,94

Аналіз досліджуваних результатів показав, що інтенсивність зношування знаходиться в кореляції з коефіцієнтом гомогенності Вейбулла (m) і пошкоджуваністю сплавів при технологічних обробках (рис. 4.4). Зі зростанням коефіцієнта гомогенності Вейбулла (m) для всіх досліджуваних сплавів відбувається підвищення зносостійкості, причому інтенсивніше в сплавах з більшим вмістом міді.

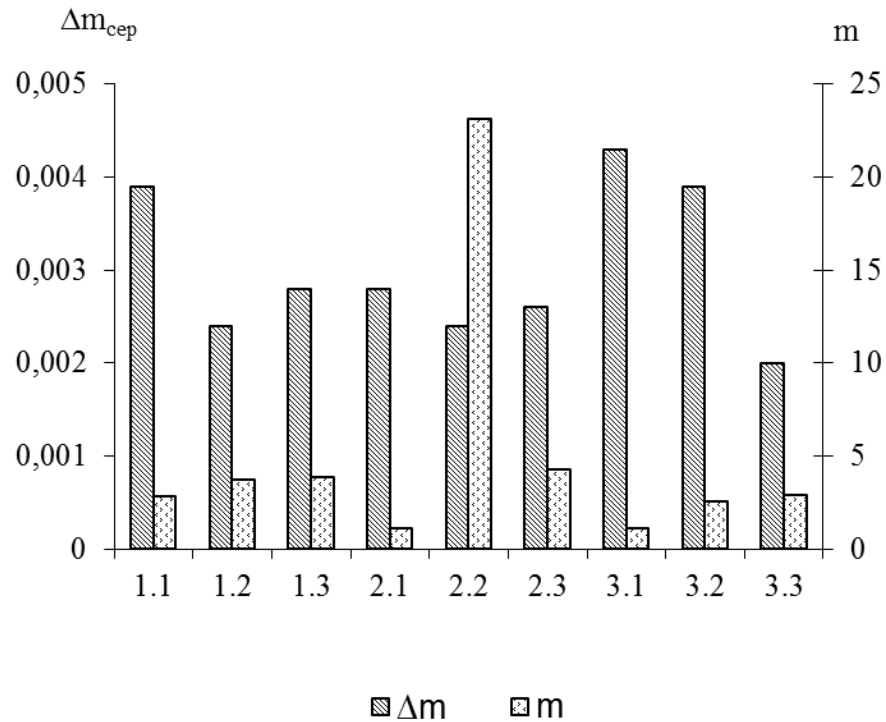


Рис. 4.4. Втрата маси ($\Delta m_{сер}$) при зношуванні і коефіцієнт гомогенності Вейбулла (m) для сплавів 1, 2, 3

Для заготовок із сплаву 2 зменшення інтенсивності зношування спостерігається після рихтування при тиску 19,2 МПа, що вказує на необхідність врахування процесів утворення і заліковування дефектів при технологічних обробках в поведінці досліджуваних сплавів.

В умовах виготовлення контактних пластин методами порошкової металургії важливе значення набуває визначення «технологічних факторів» (факторів, що визначають технологію процесу виготовлення), які мають вплив на здатність до утворення і розвитку пошкоджень під час взаємодії пластини струмоприймача електровоза і проводу. Аналіз здатності пошкоджень до розвитку оцінювали шляхом вимірювання твердості за різних навантажень. Величину твердості визначали методом Роквелла.

Таблиця 4.3

Результати вимірювань твердості пластин при навантаженнях 588,4 Н, 980,7 Н, 1471 Н та діаметрі кульки $3,175 \cdot 10^{-3}$ м

№ пластини	Силове навантаження, Н	Твердість, HRB
1.1	588,4	12,5
	980,7	39
	1471	64,5
1.2	588,4	29,5
	980,7	70,5
	1471	Утворилась тріщина
1.3	588,4	16,5
	980,7	Утворилась тріщина
	1471	Утворилась тріщина
2.1	588,4	35
	980,7	36
	1471	58
2.2	588,4	24,5
	980,7	71
	1471	74
2.3	588,4	52,5
	980,7	98,2
	1471	85
3.1	588,4	10
	980,7	38
	1471	67
3.2	588,4	21,5
	980,7	43,5
	1471	Утворилась тріщина
3.3	588,4	26,5
	980,7	83,5
	1471	Утворилась тріщина

Результати проведених досліджень показали, що при збільшенні навантаження на кульку значення твердості зростає. Суттєвий вплив на твердість має також технологія виготовлення пластин. Зразки 1 і 3, які при

рихтуванні знаходились під тиском 19,2 МПа, в умовах замірів твердості руйнувались. У той же час у сплаві 2 поява тріщин на досліджуваних зразках не виявляється навіть при найбільшому тиску рихтування 27,3 МПа.

В результаті досліджень встановлено, що в найвищу твердість мають зразки сплаву 2. Для сплавів 1 і 3 після рихтування при тисках 19,2 МПа і 27,3 МПа відбувається руйнування зразків, що свідчить про наявність значної технологічної пошкодженості при виготовленні виробів із цих сплавів.

Аналіз отриманих результатів показав, що із збільшенням навантаження на кульку та тиску рихтування довжина тріщин в сплавах зростає. Найменша довжина тріщин спостерігається в сплаві 2 після тиску рихтування 19, 2 МПа, який найкраще себе поводить в умовах контактного навантаження, а найбільша довжина тріщин у сплаві 3.

Тобто можна зробити висновок, що збільшення рихтування для контактних пластин не забезпечує підвищення експлуатаційних параметрів пластин (їх зносостійкості).

У зв'язку із тим, що утворення і поширення тріщин при дії контактного навантаження відбувається у середовищі, яке має технологічні пошкодження, що утворюються в часточках порошку і по їх границях, були проведені дослідження локальних зон розміщення тріщин на мікроскопі МЕТАМ-Р1 при збільшенні у 100 раз [24]. Даний аналіз показав, що у значній мірі їх поширення відбувається по границях часточок порошків Fe-Cu, Fe-Fe, Cu-Cu і в часточках графіту.

Тут можна зробити висновок, що саме стан «внутрішніх границь поділу» (границь часточок порошків Fe-Cu, Fe-Fe, Cu-Cu та в часточках графіту) є визначальними для подальших експлуатаційних параметрів пластин струмоприймачів.

По фотографіям десяти мікроструктур кожної пластини було проведено вимірювання довжини тріщин, що утворились в різних зонах біля відбитків порошкових матеріалів (рис. 4.5).

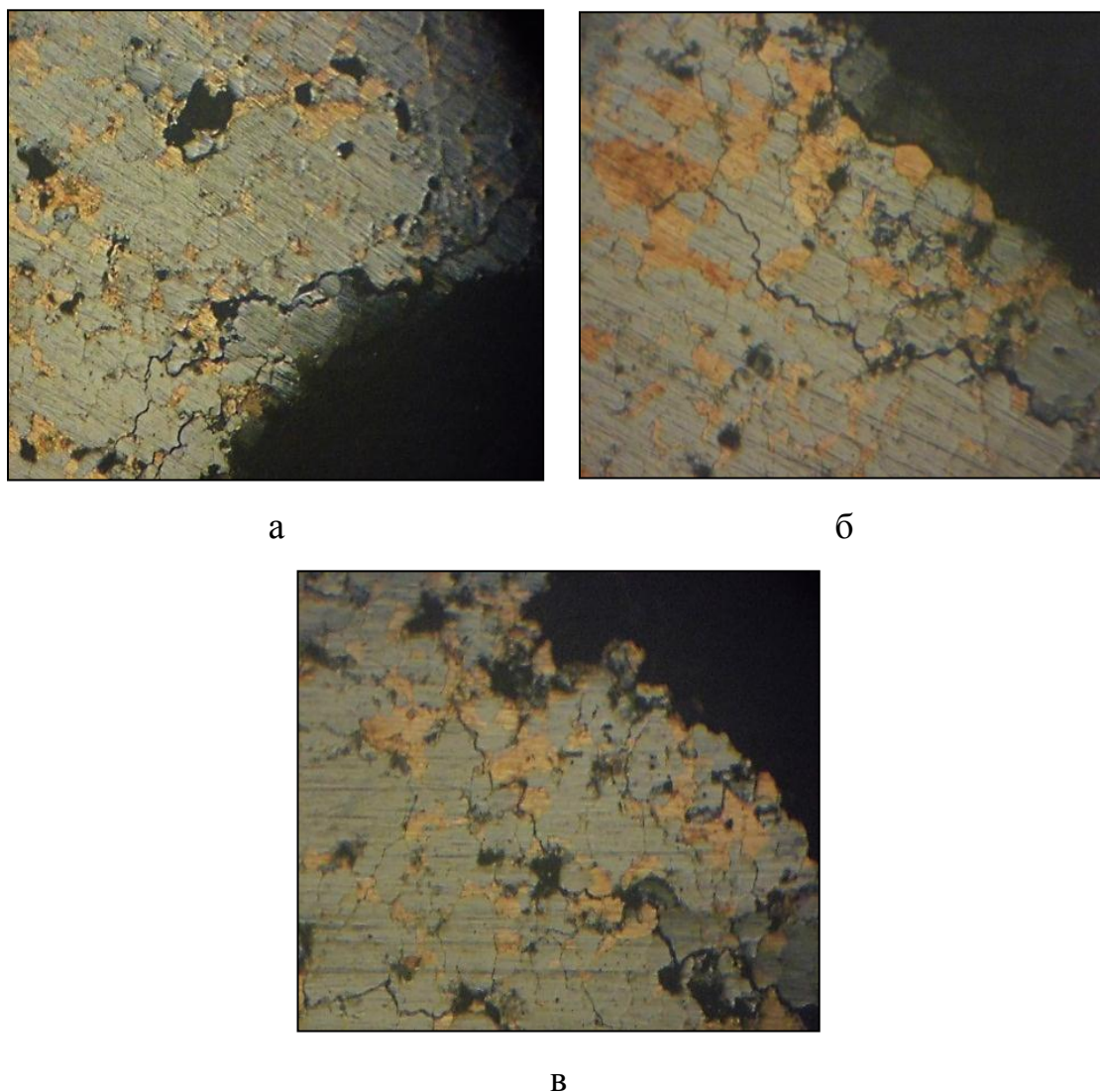
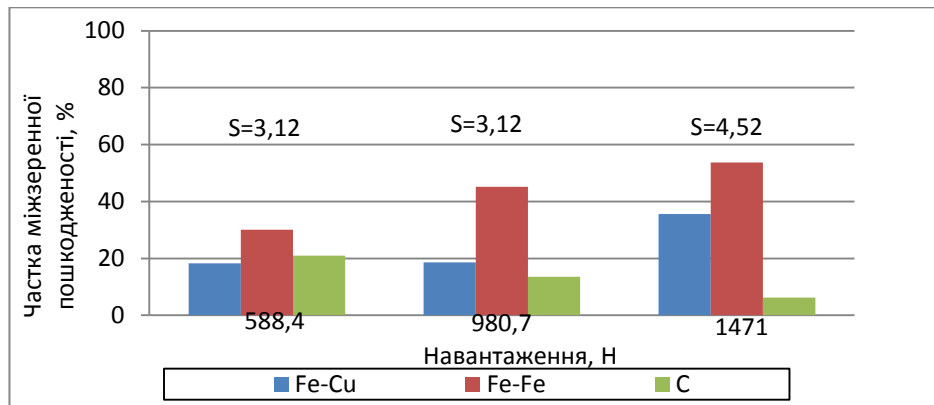


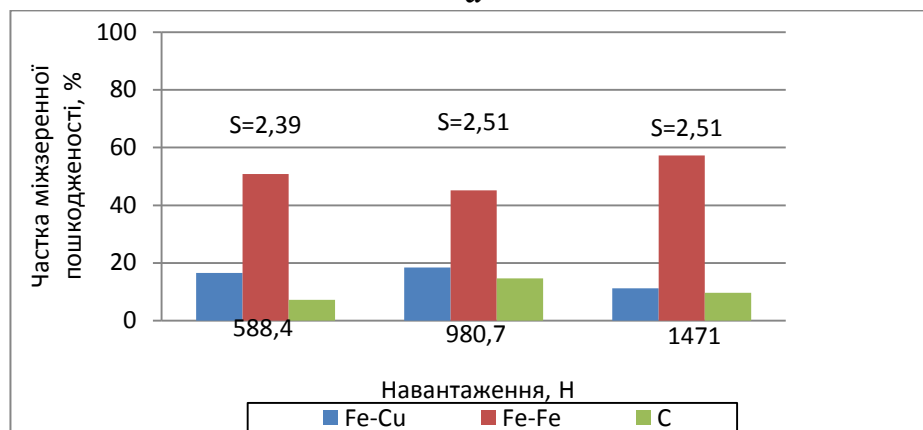
Рис. 4.5. Утворення тріщин в локальних зонах пластини 2 при замірах твердості при силових навантаженнях 588.4 Н (а), 980.7 (б), 1471 Н (в).

Дослідження показали, що найбільше тріщини утворюються на границях Fe-Fe, причому роль цих границь зростає зі збільшенням навантаження (рис. 4.6). Поверхні розділу Fe-Cu відповідно до утворення тріщин поводять себе аналогічно, але їх вплив є меншим ніж поверхонь Fe-Fe. Найменша довжина міжзеренних тріщин на поверхнях залізо-мідь спостерігається у сплаві 2. Слід відзначити, що мінімальна довжина тріщин в ділянках графіту також спостерігається у цьому сплаві.

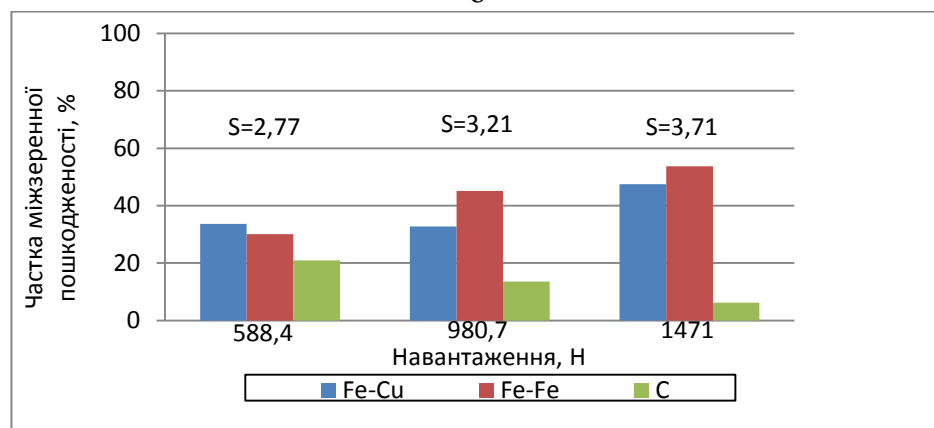
Тобто найбільш схильними до утворення тріщин є границі поділу («внутрішні інтерфейси») часточок залізо-залізо. Це є найбільш критичним для даного виду порошкових виробів.



а



б



в

Рис. 4.6. Частка локальних зон утворення тріщин в їх загальній довжині (s) при силових навантаженнях на кульку 588 Н, 980,7 Н і 1471 Н для сплавів: а – 1.2; б – 2.2; в – 3.2.

Формування неоднорідного напружено-деформованого стану за рахунок концентрації в локальних зонах дефектів сприяє прискореному руйнуванню сплаву. Основними чинниками (факторами), які мають вирішальний вплив на

поведінку сплавів, є розмір часточок Fe, Cu, C. Важливе значення при цьому відіграє наявність границь з більшою дефектністю.

Зростання їх частки сприяє утворенню пошкоджень при дії зовнішнього навантаження.

Згідно моделі функціонально-градієнтної будови границь зерен, яка прийнята на даний момент у нелокальній механіці, наявність ввігнутих границь з більшою кількістю вакансій і пор, а також присутність на границях фаз нестехіометричного складу сприяє переходу окремих пор у поровий простір і утворенню міжзеренних тріщин.

В роботі [24], проведена систематизація факторів, які впливають на схильність до руйнування по границях зерен порошкових виробів (рис. 4.7).

Схильність до утворення міжзеренних пошкоджень і тріщин залежить від структури порошкових виробів (а саме від властивостей інтерфейсу між частинками порошоків) і напружено-деформованого стану в області контактної взаємодії.

Використання дисперсних порошоків із однорідною дисперсністю, підвищення однорідності міцнісного стану підвищує опір міжзеренному знеміцненню виробів, що отримані методами порошкової металургії.

Таким чином, для отримання якісних порошкових виробів необхідно формувати виріб із дрібних часточок однакових розмірів, причому графітні вclusions повинні мати кулясту форму, щоб уникати локальних концентраторів напружень.

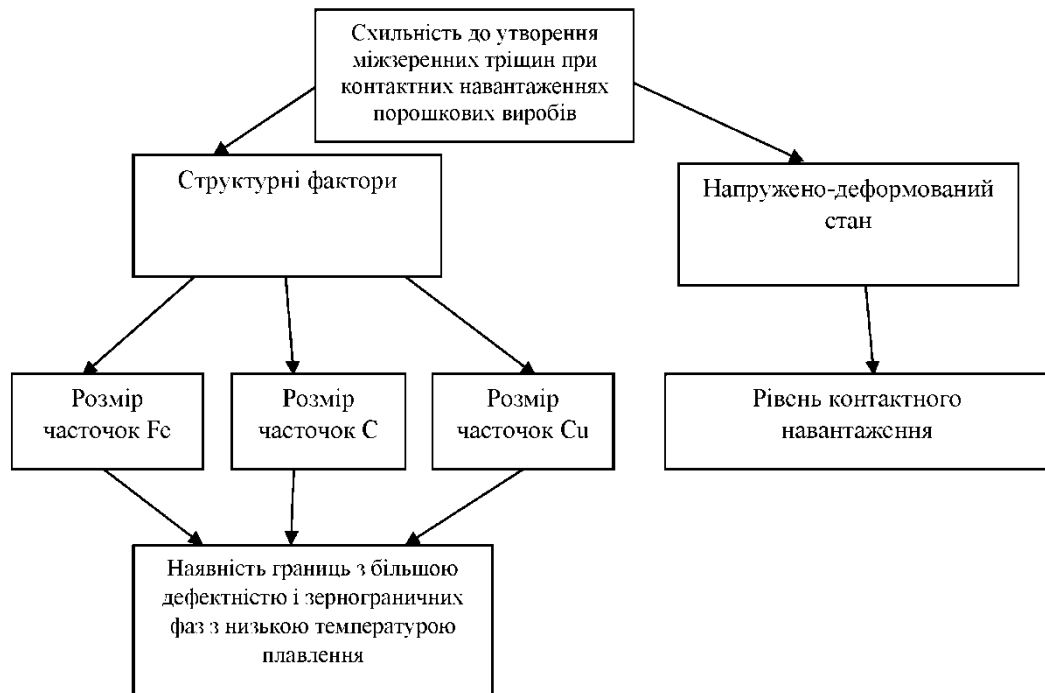


Рис. 4.7. Фактори, що сприяють утворенню міжзеренних пошкоджень у порошкових виробках.

Розширимо трактування результатів, які подані на рис. 4.7.

Як видно, одним із найбільш важливим факторів для утворенню руйнування у пластинах є наявність границь «інтерфейсів» із більшою дефектністю та зерно граничних фаз із низькими енергетичними характеристиками.

Аналіз вищенаведених результатів дозволяє стверджувати, що найкращим способом «усунення» цих факторів є легування (внесення під час виготовлення пластин) хімічно активних речовин, які підвищують міцнісні та експлуатаційні параметри «зернограничних інтерфейсів» з метою отримання контактних пластин із більшими параметрами довговічності.

Відмітимо, що при цьому практично не зростає твердість пластин, зовнішнє тертя переходить у «внутрішнє тертя» тіла, а знос контактного дроту практично не змінюється.

Тобто тут (у даній дипломній роботі) пропонується не підвищувати твердість пластин (як у класичних роботах із механіки трибологічних пар), а

збільшувати їх ресурс за рахунок сучасних підходів інженерії зовнішніх та внутрішніх інтерфейсів у тілах контактуючих пар.

4.4 Висновки

1. Подана задача оптимізації експлуатаційних параметрів характеристик струмоз'ємних пластин.

2. Показана можливість використання підходів прикладної трибології при подовженні строки служби вузлів тертя, що полягає у використанні підходів термодинаміки для оцінки міцністних параметрів трибоконтрукцій, виборі оптимальних параметрів тіл пари тертя та технологічному формуванні структури, яка найбільш відповідає даним параметрам взаємодії контактних спряжень.

3. Розглянута можливість використання даних підходів для оптимізації та підвищення зносостійкості експлуатаційних параметрів контактних пластин. На основі прикладних статей керівника даної дипломної роботи запропоновано формувати у пластинах методами порошкової металургії «зернограничних інтерфейсів» із підвищеними параметрами міцності, що дозволяють енергію зовнішнього тертя переходити у «внутрішнє тертя» тіла. При цьому практично не зростає твердість пластині знос контактного дроту також практично не змінюється.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуті будова пантографів тягового рухомого складу та особливості їх роботи. Показано, що на даний момент існує багато типів струмоприймачів в залежності від умов експлуатації та технічних вимог, але вибір та оптимізація конструкції струмоприймача на даний час є відкритою науковою проблемою. Проаналізовані умови роботи та вимоги до сучасних струмоз'ємних пристроїв. Встановлено, що основним параметром, який характеризує роботу струмоприймачів є процес струмознімання, що визначається умовами механічної взаємодії рухомого струмоприймача та контактної підвіски; вибором матеріалів контактуючих частин: контактного дроту та струмознімальних елементів струмоприймача. Встановлено, що забезпечення заданої якості струмознімання та роботи пантографів є відкритою проблемою, що потребує свого подальшого вирішення.

2. Проведено аналіз вимог нормативних документів струмоз'ємних пристроїв згідно вимог TSI Loc&Pas. Показані вимоги до геометричних параметрів (габаритів) пантографів, матеріалу, статичних та динамічних навантажень. Показані вимоги до пантографів локомотивів України згідно нормативних документів УЗ. Встановлено, що деякі параметри струмознімачів, як габарити, середня сила натиснення, динамічні характеристики регламентуються, а такі параметри як ступінь (характеристика) струмоз'єму, зносостійкість та надійність пантографів є питання відкритими. Це дозволяє говорити про те, що узгодження роботи пантографів з позицій нормативів ЄС та України, з метою моделювання та оптимізації роботи є відкритою науковою проблемою.

3. Розглянуті фізичні уявлення, які необхідні для побудови математичної моделі динамічної поведінки пантографів рухомого складу. Записане формулювання математичної моделі динаміки складної конструкції контактний дріт – пантограф – локомотив. Новизна побудованих співвідношень полягає у тому, що врахована залежність зміни пружних та в'язких

характеристик коливної системи від параметрів переміщень та швидкості руху їх складових. Сформульована оптимізаційна задача забезпечення сталості статичного контакту та якості процесу струмозйому. Якісний аналіз сформульованих рівнянь дозволив запропонувати конструктивні шляхи, що мають забезпечувати сумісність жорсткості та в'язкості механізму пантографу за параметром статичного навантаження згідно вимог УЗ та залізниць країн ЄС.

4. Подана задача оптимізації експлуатаційних параметрів характеристик струмоз'ємних пластин. Показана можливість використання підходів прикладної трибології при подовженні строки служби вузлів тертя, що полягає у використанні підходів термодинаміки для оцінки міцнісних параметрів трибокострукцій, виборі оптимальних параметрів тіл пари тертя та технологічному формуванні структури, яка найбільш відповідає даним параметрам взаємодії контактних спряжень. Розглянута можливість використання даних підходів для оптимізації та підвищення зносостійкості експлуатаційних параметрів контактних пластин. На основі прикладних статей керівника даної дипломної роботи запропоновано формувати у пластинах методами порошкової металургії «зернограничних інтерфейсів» із підвищеними параметрами міцності, що дозволяють енергію зовнішнього тертя переходити у «внутрішнє тертя» тіла. При цьому практично не зростає твердість пластині знос контактного дроту також практично не змінюється.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Babyak M. Problems of interaction of contact wire and current collectors of electric transport with different contact materials// BulTrans-2019 Conference Proceedings. – p. 97-105.
2. Михеев, В.П. Контактные сети и линии электропередач: Учебник для вузов ж.-д. транспорта. / В.П. Михеев. – М.: Маршрут, 2003. – 416 с.
3. Куліченко А.Я., Мілянч А.Р. Математичний аналіз роботи струмоз’ємного механізму електротранспорту. – Л.: Паїс, 2011. – 252 с.
4. Беляев И.А. Машинисту о контактной сети и токосъеме. – М.: Транспорт, 1986. – 128 с.
5. ЦТ-ЦЕ–0104 «Інструкція щодо порядку використання струмоприймачів електрорухомого складу в різних умовах експлуатації».
6. Корнійчук М.П., Липовець Н.В., Шамрай Д.О. Технологія галузі і технічні засоби залізничного транспорту. Частина 1. – К.: Дельта, 2007. – 504 с.
7. Численное моделирование динамики токоприемника при взаимодействии с контактной подвеской / Е.В. Авотин [и др.] // Вестник ВНИИЖТа. – 2008. – № 3. – С. 42–45.
8. Commission Regulation (EU) No 1302/2014 of 18 November 2014 concerning a technical specification for interoperability relating to the ‘rolling stock — locomotives and passenger rolling stock’ subsystem of the rail system in the European Union.
9. EN 50367:2012 “Railway applications - Current collection systems - Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line”
10. EN 50367:2012/AC:2013 “Railway applications – Current collection systems -Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line”
11. ЦЕ-0009 «Правила улаштування системи тягового електропостачання»
12. ЦЕ-0023 «Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць». Затв.: Наказ Укрзалізниці

20.11.2007 р. №546-Ц / М-во транспорту та зв'язку України. Держадміністрація залізничного транспорту України. Укрзалізниця. Голов. управ. електрифікації та електропостачання. - К. : Інпрес, 2008. - 207 с.

13. ДБН В.2.3-19-2008 «Споруди транспорту. Залізниці колії 1520 мм. Норми проектування.»

14. Правила технічної експлуатації залізниць України. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97#Text>

15. ВНД 31.1.07.000-02 «Тимчасова інструкція щодо організації швидкісного руху пасажирських поїздів. Вимоги до інфраструктури та рухомого складу».

16. ГОСТ 2584-86. «Провода контактные из меди и ее сплавов. Технические условия».

17. Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. – Wiley&Sons, 2009. – 994 p.

18. Марквардт, К.Г. Контактная сеть: Учебник для вузов ж.-д. транс. / К.Г. Марквардт, И.И. Власов. – М.: Транспорт, 1977. – 271 с.

19. Munaliza I., Mohd A., Mohd H. Fathiah M., Fauzi A. Railway pantograph model verification and analysis// Proceedings of Mechanical Engineering Research. -2022. - pp. 107-108.

20. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохимия и реология износостойкости. – Хмельницький: ХНУ, 2006. – 278 с.

21. Сорокин В.М., Курников А.С. Основы триботехники и упрочнения поверхностей деталей машин. – Н. Новгород: 2006. – 296 с.

22. Тарельник В.Б. Триботехнічне матеріалознавство та триботехнологія в задачах. – Суми: Університетська книга, 2014. – 192 с.

23. Роль технологічних режимів у формуванні пошкодженості контактних пластин електровозів, отриманих методом порошкової металургії/ О.А. Кузін, О.С. Мінеєв, М.О. Кузін// Залізничний транспорт України. – 2015. – № 6. – С. 33 – 40.

24. Лебедев А.А. Оценка поврежденности конструкционных сталей по параметрам рассеяния характеристик твердости материалов в нагруженном и разгруженном состояниях / А.А. Лебедев, Н.Р. Музыка, В.П. Швец// Проблемы прочности. – 2008. – № 3. – с. 29-37.