

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет Львівського інституту
(назва факультету)

Рухомий склад залізниць і колія
(повна назва кафедри)

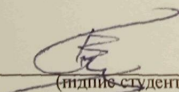
Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
бакалавр
(ступінь вищої освіти)

на тему: «Обґрунтування і удосконалення технології плазмового зміцнення колісних пар локомотивів»

за освітньою програмою Локомотиви та локомотивне господарство
зі спеціальності: 273 Залізничний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

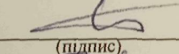
Виконав: студент

студент групи: ЛГ 18118


(підпис студента)

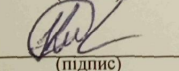
/ Зенон БЕНЬКО /
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:


(підпис)

/ доцент Микола КУЗІН /
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:


(підпис)

/ викладач Іван КРАВЕЦЬ /
(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

(назва розділу)

(підпис)

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(назва розділу)

(підпис)

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(назва розділу)

(підпис)

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(назва розділу)

(підпис)

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

Студент


(підпис)

Львів – 2022 рік

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

L'viv Institute
(faculty)

Railway rolling stock and track
(department)

Explanatory Note
to Bachelor's Thesis

(higher education degree)

on the topic: Substantiation and improvement of the technology of plasma hardening of wheel sets of locomotives

according to educational curriculum Locomotives and locomotive establishment

in the Speciality: 273 Railway transport

(speciality and its code)

Done by the student of the group:

/ Zenon Ben'ko /
(name, surname)

Scientific Supervisor:

/ assistant professor Mykola Kuzin /
(position, name, surname)

Normative controller :

/ lecturer Ivan Kravets /
(position, name, surname)

Supervisors

(Chapter title heading)

/ /
(position, name, surname)

(Chapter title heading)

/ /
(position, name, surname)

(Chapter title heading)

/ /
(position, name, surname)

(Chapter title heading)

/ /
(position, name, surname)

Lviv – 2022

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Аналіз сучасних вимог, які ставляться до колісних пар локомотивів	7
1.1 Будова та узагальнені вимоги до колісних пар тягового рухомого складу	8
1.2 Вимоги до експлуатаційних параметрів колісних пар тягового рухомого складу згідно стандартів	10
1.3 Висновки	13
2 Технологічні та експлуатаційні фактори, що впливають на працездатність колісних пар	14
2.1 Механізми руйнування поверхневих шарів металів при терті	14
2.2 Вплив технологічних факторів на службові властивості деталей	17
2.3 Висновки	21
3 Сучасні способи підвищення експлуатаційної довговічності колісних пар	22
3.1 Аналіз технологій, які використовуються для підвищення довговічності пар тертя	22
3.2 Підвищення експлуатаційних властивостей поверхні кочення коліс висококонцентрованими джерелами енергії	32
3.3 Висновки	34
4 Обґрунтування технологічних режимів підвищення експлуатаційних параметрів колісних пар за допомогою плазмового зміцнення.	35
4.1 Побудова математичних співвідношень для встановлення оптимальних параметрів структури бандажів колісних пар	35
4.2 Розрахунок і обґрунтування глибини зміцненого шару	37
4.3 Висновки	41
Висновки	42
Перелік посилань	43

0041.180551.01.ВКР.ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
		Розробив	БЕНЬКО Зенон	17.06	Обґрунтування і удосконалення технології плазмового зміцнення колісних пар локомотивів	Літера	Аркуш	Аркушів
		Консультант					5	44
		Керівник	КУЗІН Микола	17.06		ЛІ УДУНТ		
		Н. Контр.	КРАВЕЦЬ Іван	15.06.22				
		Зав. каф.	БАЛЬ Олена					

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Львівського інституту
Кафедра: Рухомий склад залізниць і колія
Рівень вищої освіти: бакалавр
Освітня програма: Локомотиви та локомотивне господарство
Спеціальність: 273 Залізничний транспорт
(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____
_____ Олена БАЛЬ _____
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Дата _____

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу _____
бакалавра _____
(ступінь вищої освіти)

студенту Беньку Зенону Віталійовичу
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Обґрунтування і удосконалення технології плазмового зміцнення колісних пар локомотивів»

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

затвержені наказом від " 26 " 11 2021 р. № 38 ст

2. Строк подання студентом роботи: 10.06.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: аналіз сучасних вимог, які ставляться до колісних пар локомотивів, що наведені у науковій та технічній літературі

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

4.1 Аналітична частина: аналіз нормативно-технічної, наукової літератури та встановлення основних факторів, які мають вплив на працездатність колісних пар

4.2 Основна частина: методи підвищення експлуатаційних властивостей колісних пар та обґрунтування їх оптимальних технологічних режимів

4.3 Охорона праці та захист навколишнього середовища:

4.4 Економічна частина:

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
графічна частина не передбачена

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., доцент		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасних вимог, які ставляться до колісних пар локомотивів	28.04.22	
2	Аналіз нормативно-технічної документації із впливу технологічних факторів на підвищення працездатності колісних пар	12.05.22	
3	Проведення розрахунку роботи приповерхневих шарів коліс МСЕ	26.05.22	
4	Аналіз проведених розрахунків, надання практичних рекомендацій	01.06.22	
5	Оформлення аналітичної частини роботи	08.06.22	
6	Повне оформлення роботи	09.06.22	
7	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	10.06.22	
8	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії		

Студент

_____ (підпис)

Зенон БЕНЬКО

_____ (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Микола КУЗІН

_____ (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра:
(рівень освіти)

44 стор., 9 рис., 16 джерел.

Об'єкт розробки – технологія плазмового зміцнення колісних пар локомотивів.

Мета роботи – встановлення оптимальної глибини на яку потрібно зміцнювати бандажі колісних пар.

Методи дослідження – методи обчислювальної механіки (метод скінчених елементів).

Визначено оптимальну глибину зміцнення колеса, глибше за яку не доцільно проводити обробку конструкції, оскільки це не призведе до суттєвого підвищення міцнісних параметрів колеса, але вимагатиме більше енергетичних затрат.

Результати роботи можуть стати основою для подальшої оптимізації технологій інженерії поверхні, які використовуються на залізничному транспорті.

Ключові слова: ЛОКОМОТИВИ, БАНДАЖІ КОЛІСНИХ ПАР, ЗМІЦНЕННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

ВСТУП

Згідно відкритих науково-технічних джерел, вузли тертя рухомого складу на 80-90% визначають ефективність його функціонування, а втрати, що викликані зношуванням в системі колесо-рейка складають від 10 до 30 %, розходів на тягу поїздів.

В цьому зв'язку, підвищення експлуатаційних параметрів колісних пар рухомого складу – це є однією із найбільш затребуваною проблем сучасного залізничного транспорту.

Вирішення цієї задачі дозволить значно підвищити економічну ефективність роботи галузі, забезпечити її конкурентоспроможність на ринку перевезень, зменшити негативний вплив людського чинника на функціонування транспорту та підвищити безпеку руху.

В цьому зв'язку, інженерне обґрунтування технологій підвищення життєвого циклу виробів набуває надзвичайно важливе значення.

Дана робота і призначена як раз інженерному обґрунтуванню технології плазмового зміцнення гребенів бандажів колісних пар локомотивів, що дозволить у подальшому підвищити ресурсозбереження при функціонуванні транспортних систем.

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ВИМОГ, ЯКІ СТАВЛЯТЬСЯ ДО КОЛІСНИХ ПАР ЛОКОМОТИВІВ

1.1 Будова та узагальнені вимоги до колісних пар тягового рухомого складу

Колісні пари локомотивів є достатньо дороговартістними деталями і тому для їх здешевлення використовують бандажі.

Згідно аналізу літературних джерел [1], вперше залізничні бандажі були використані у Шотландії у 1827 році інженером промисловцем Вудом. Бандажі Вуда понад 10 років виготовлялись із прокатаних полос, які згинались у кільце і зварювались.

З 1889 році у США була зроблена спроба виготовлення чавунних коліс із зміцненим ободом, які достатньо довгий час експлуатувались також і у Європі.

Виробництво бандажів зі сталі для колії 1520 (1524) мм почалось з 1867 року, причому бандажам (с термінології того часу - шинам) виставлялись дуже жорсткі умови: як до якості сталі, розмірних параметрів, ударної стійкості, границі міцності, так і гарантованої довговічності (строку служби). У випадку зношування раніше прописаного терміну, бандаж мав бути замінений за рахунок заводу – постачальника. Для паровозних бандажів гарантований строк роботи мав складати не менше 1 року [2].

Також достатньо чітко регламентувались геометричні параметри бандажу (найменш допустимі розміри), та профілі бандажів.

Розглянемо загальну будову сучасної колісної пари тягового рухомого складу, який використовується також і на Україні (рис. 1.1).

										6.273.180551.ПЗ	Арк.
											7
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата							

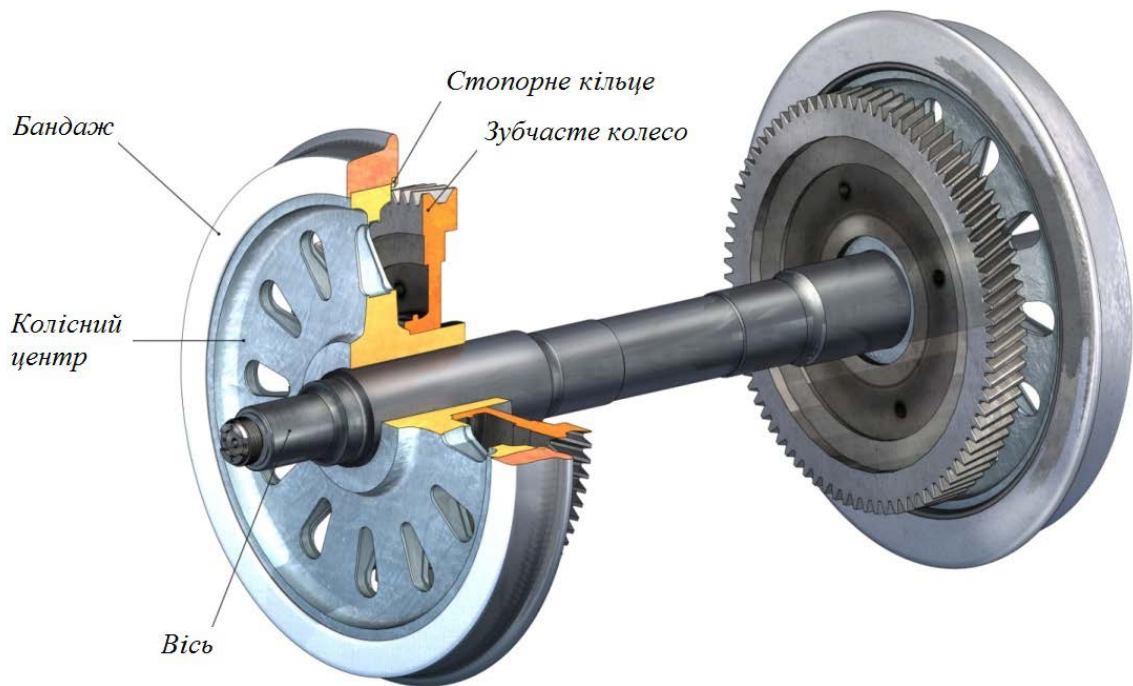


Рисунок 1.1 – Будова колісної пари тягового рухомого складу
(локомотива ВЛ80с)

Як видно із даного рисунку, колісна пара складається з осі, двох коліс та одного або двох зубчастих коліс. На вісь колісної пари напресовують за допомогою гідравлічного преса колісні центри. Колісні центри електровозів виготовляють із дисків з прорізами (рис. 1.1).

Колісна пара локомотивів призначена для спрямування рухомого складу по рейковій колії для передачі тягових і гальмівних сил на раму візка, для перетворення обертального руху тягового електродвигуна у поступальний рух електровоза, а також сприйняття динамічних та статичних навантажень між рейками та колесом.

Колісна пара складається з осі, 2 колісних центрів, 2 бандажів, 2 бандажних кілець, зубчастого колеса (зубчастих коліс) (ВЛ80С 2 шт.).

Бандаж - насаджується на обід колісного центру, виготовлений із спеціальної високоякісної сталі, розміри його виконані згідно зі стандартами, так само вибирається і профіль. Правильність профілю бандажа перевіряють за допомогою спеціальних шаблонів. Профіль бандажу складається з гребеня, кола катання, бурта та виточення під бандажне кільце.

Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата

6.273.180551.ПЗ

Арк.

8

Під час експлуатації локомотивів, особливо в гірських умовах, проходить зношування бандажів колісних пар – зміна їх профілю під дією сил, що виникають між колесом та рейкою під час руху.

Зміна профілю бандажів, яка є понаднормовою, може призвести до аварій та сходу з рейок рухомого складу.

В цьому зв'язку параметри профілю бандажів локомотивів є жорстко нормовані у технічній документації.

Наведемо основні вимоги даних нормативних документів.

Згідно статті 2 Закону України про залізничний транспорт [3], підприємства залізничного транспорту повинні не тільки здійснювати перевезення вантажів і пасажирів, але й забезпечувати необхідний рівень безпеки руху.

Безпека руху регламентується статтею 11 Закону [3], в якому вказано, що під безпекою руху розуміється комплекс організаційних та технічних міроприємств (заходів), які спрямовані на утримання у справному стані та підтриманні безаварійної експлуатації рухомого складу, інфраструктури і т.д.

Узагальнені вимоги до колісних пар рухомого складу подані у Правилах технічної експлуатації Залізниць України [4] у Розділі 10.

Відповідно до п. 10.3 Правил [4], не можна експлуатувати рухомий склад, колісні пари якого тріщини, підрізану частину гребеня коліс, прокат гребеня більше заданих параметрів та повзуни. Всі ці зношення та пошкодження колісних пар можуть призвести до порушення нормальної взаємодії колії та рухомого складу і, як результат до сходу рухомого складу.

Більш детальні вимоги, що параметрів колісних пар тягового рухомого складу описані у Інструкції [5].

Згідно даної Інструкції під час огляду колісних пар необхідно перевіряти: «на бандажах і обіддях суцільнокатаних коліс - відсутність тріщин, повзунів, вибоїн, плен, роздавленостей, вм'ятин, відколів, раковин, вищербин, ослаблення бандажів на ободі центру, ослаблення бандажного кільця, зсуву бандажа, граничного прокату, граничної висоти й товщини

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

гребеня, а також небезпечної форми гребеня (крутизни гребеня) і гострокінцевого накату, що є ознакою можливості небезпечної форми гребеня.»

Несправності колісних пар даного виду рухомого складу подані у Розділі 5 даної Інструкції, який має назву «Несправності колісних пар і способи їх усунення».

Згідно пункту 5.2 даної Інструкції, є 21 вид несправності колісних пар.

Серед даних несправностей необхідно відмітити наступні: раковини, плени, вищербини, виїмки, повзуни, прокат, які можна усунути на верстаті.

Разом із тим, усунення даних несправностей вимагає таких додаткових ресурсів як робота верстатів, кваліфікованого персоналу та додаткове зношення металу з поверхні бандажу.

Серед видів ремонту колісних пар тягового рухомого складу без заміни елементів виконуються наступні [5]: обточування ободів суцільнокатаних коліс і їх бандажів; обточування, накатка, шліфування шийок осей; заміна заклепок і пластинчастих пакетів зубчастих коліс колісних пар; випробування на пресі колісних пар з ознаками ослаблення; кріплення зубчастого вінця, заміна призонних болтів; ремонт пружних елементів зубчастих коліс, що не вимагає розпресування центрів; наплавлення гребенів і зміцнення гребенів бандажів за технологією, яка затверджена в установленому порядку, а також зварювальні роботи без розпресування елементів.

1.2 Вимоги до експлуатаційних параметрів колісних пар тягового рухомого складу згідно стандартів

Вимоги до експлуатаційних параметрів бандажів колісних пар локомотивів описані у стандартах [6-8], які також дійсні на території України: ГОСТ 11018-2011 «Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм» [6], ГОСТ 3225-80 «Бандажи черновые для локомотивов железных дорог широкой колеи. Типы и размеры» [7], ГОСТ

									Арк.
									10
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата					

6.273.180551.ПЗ

31373-2008 «Колесные пары локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава. Расчеты и испытания на прочность» [8].

Згідно стандарту пункту 4 стандарту [6], деталі (елементи) колісної пари, а саме бандажі мають відповідати наступним технічним вимогам, які описані у стандартах ГОСТ 398-2010 «Бандажи черновые для железнодорожного подвижного состава. Технические условия» [9], ГОСТ 5267.10-90 «Профиль для бандажных колец. Сортамент» [10].

Вимоги до технології посадки бандажів на колісні центри описані у пункті 4.2.2 стандарту [6] (п. 4.2.2.15 – 4.2.2.19), де подані силові та температурні режими даної технології.

Вимоги до матеріалу, з якого виготовляють бандажі, подані у ГОСТ 398-2010 [8], де вказано хімічний зміст металу, з якого виготовляють бандажі, механічні властивості, твердість та ударна в'язкість бандажів, норми забрудненості металів неметалічними включеннями, недопустимість наявності на поверхні бандажів дефектів та концентраторів напружень.

Наведемо деякі фрагменти даного стандарту.

Вимоги до хімічного змісту подані у табл. 1.1 [8].

Таблица 1.1

Марка сталі	Масова доля елементів, %						
	C	Mn	Se	Cr	V	P	S
2	0.57-0.65	0.60-0.90	0.22-0.45	не більше 0,2	0,15	0.03	0.02
4	0.65-0.75			0.2-0.6			

Відмітимо, що вказаний хімічний вміст характерний для всього виробу як «осереднений параметр», а не вказаний для «локальних об'ємів» у конкретному місці виробу.

Крім того бандажі мають певним відповідати вимогам на конструкційну міцність, які прописані додатково у ГОСТ 31373-2008 [8].

Наведемо ці вимоги.

Згідно із таблицею 1 ГОСТ 31373-2008 [8], проводять розрахунки на міцність для вибору раціональної конструкції чи попереднього аналізу

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата	6.273.180551.ПЗ				

напружено-деформованого стану, оцінку сумарного напруженого стану та оцінку міцності деталей колісних пар.

Згідно із [8], розрахунки колісної на міцність (таблиця 1, пункт 1) включають: визначення напружено-деформованого стану колеса від дії: монтажних натягів з'єднання колеса з віссю, бандажа з колісним центром, елементів тягового приводу із диском колеса; експлуатаційних механічних навантажень - вертикальних, бічних горизонтальних, дотичних (тільки для спицевої конструкції колісного центру); експлуатаційних термічних навантажень гальмування; оцінку осьових та радіальних деформацій обода цілого або бандажа складового колеса при нагріванні від гальмування та внаслідок зменшення товщини обода (бандажу) через знос та ремонтні обтікання; оцінку міцності з'єднання колеса (цілісного, складеного, зубчастого) та маточини гальмівної диска з віссю та бандажа з колісним центром; оцінку міцності та деформацій осі колісної пари від дії експлуатаційних механічних навантажень.

При цьому в якості методу розрахунку використовують метод скінчених елементів.

В результаті розраховують коефіцієнт запасу статичної міцності диска колеса, коефіцієнт запасу статичної міцності осі колісної пари, коефіцієнт запасу опору втоми колеса, коефіцієнт запасу опору втоми осі (Таблиця А.1. Критерії оцінки колісних пар та їх деталей за показниками міцності).

Згідно даної таблиці, коефіцієнт запасу статичної міцності колеса дорівнює:

$$n_k = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}^{екв}} \geq [n_k], \quad (1.1)$$

де σ_T - межа текучості матеріалу,

$\sigma_{\max}^{екв}$ - максимальні еквівалентні напруження,

$[n_k]$ - допустимий коефіцієнт запасу статичної міцності, $[n_k]=1.0..1.2$, якщо сумарні напруження в найбільш навантаженій зоні колеса є стискаючими, то на довжині колеса не більше 15 мм, допустимий коефіцієнт

									Арк.
									12
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата					

6.273.180551.ПЗ

запасу статичної міцності диска колеса може бути встановлений не менше ніж 0,9.

Коефіцієнт запасу опору втоми колеса дорівнює:

$$n_{yk} = \frac{\sigma_{a0} K_2}{\sigma_{ai} K_1} \geq [n_{yk}], \quad (1.2)$$

де σ_{a0} - межа витривалості колеса, отримана за результатами його стендових випробувань при асиметричному циклі навантаження з урахуванням дії монтажних та залишкових напруг;

σ_{ai} - найбільше значення амплітуди напруги від динамічних навантажень у вибраній точці колеса;

K_2 - коефіцієнт, що враховує залежність опору втоми від значення сумарних середніх напружень циклу під час експлуатації;

K_1 - коефіцієнт, що враховує залежність опору втоми від значення сумарних середніх напружень циклів при стендових випробуваннях.

Залишкові напруження стиску на поверхні катання чорного бандажу – при радіальному розрізі бандажу від вершини гребеня до внутрішнього діаметра бандажа базова відстань має зменшитись не менше ніж на 3 мм. Значення показника має бути уточнене за рахунок зміни хімічного складу та режиму гарту бандажу.

1.3 Висновки

1. Встановлено, що вимоги до зносостійкості бандажів колісних пар не наведені в жодних нормативних документах.

2. Це дозволяє стверджувати, що питання зносостійкості бандажів колісних пар, особливо при неоднорідності хімічного стану матеріалу, механічних властивостей є відкритими та важливим для сучасного стану розвитку тягового рухомого складу.

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

2 ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ КОЛІСНИХ ПАР

2.1 Механізми руйнування поверхневих шарів металів при терті

Під зношуванням в даній роботі будемо розуміти процес поступової зміни розмірів та маси деталей залізничної техніки, що відбувається при терті (фрикційній взаємодії), яке виникає в результаті руйнування поверхневих шарів під впливом зовнішніх механічних впливів та середовища [11].

Під зношуванням бандажів колісних пар залізничного рухомого складу прийнято вважати зміну їх профілю під впливом сил, що виникають між колесом та рейкою під час руху.

У практиці величина зношування колеса оцінюється розміром виробітку по колу його катання, що називається прокатом, а також зменшенням товщини гребеня. Величина зносу бандажів колісних пар рухомого складу залізниць загального користування вимірюється за допомогою спеціальних контрольно-вимірювальних приладів, затверджених встановленим порядком.

Розглянемо механізми руйнування поверхневих шарів металів.

Згідно [11, 12], процес руйнування поверхні відбувається під впливом різних причин. Насамперед, він може бути викликаний концентрацією напружень у приповерхневих шарах матеріалу при терті, що призводить до тріщиноутворення та відділення фрагментів матеріалу (часточок зносу) з поверхні тертя.

Цей найпоширеніший вид зношування називається механічним зношуванням, при цьому часто слово "механічний" опускається. При ударному впливі на поверхню твердих частинок або крапель виникає ерозійне зношування.

Серед інших видів зношування слід зазначити руйнування поверхні, спричинене перебігом хімічних та електрохімічних реакцій. Прикладом такого механізму зношування є корозійне зношування, зумовлене

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

одночасним впливом механічних та електрохімічних факторів. Цей механізм зношування переважає в рухомих поєднаннях, що працюють у хімічно активному середовищі.

Деякі фізичні процеси можуть викликати зношування поверхні. Наприклад, відомо, що більшість енергії, витраченої на тертя, перетворюється на тепло. Збільшення температури поверхневих шарів може спричинити зміну агрегатного стану матеріалу. У цьому випадку зношування обумовлене розплавленням і витіканням розплавленого матеріалу із зони тертя або його випаровуванням (наприклад, зношування у гальмах, високошвидкісних напрямних тощо). Висока температура прискорює також процеси дифузії, що в деяких випадках впливають на характер зношування (наприклад, у ріжучому інструменті). При цьому зношування має місце на атомному та молекулярному рівнях.

Слід зазначити, що зношування, що має місце в рухомих частинах машин та механізмів, як правило, обумовлене одночасною дією різних причин. Тому виділення та вивчення різних механізмів зношування окремо є певною мірою ідеалізацією реальних процесів різної природи, що протікають на поверхні тертя і призводять до її формозміни.

Оскільки при терті контакт тіл, найчастіше відбувається не по всій поверхні, а лише в особливих областях – плямах контакту, то і руйнування поверхні починається в їх околі.

Згідно [12], руйнування поверхні зазвичай виникає поблизу плям контакту, у яких мають місце високі значення нормальних і дотичних напружень. При цьому руйнування може спостерігатися як після одноразового, так і повторюваного навантаження поверхні в точці, що розглядається.

Руйнування при одноразовому навантаженні виникає, якщо внутрішні напруження, викликані цим навантаженням, настільки великі, що критерій руйнування виконується в одній або кількох точках тіл, що взаємодіють. Цей тип руйнування спостерігається при адгезійному зносі, що характеризується

									6.273.180551.ПЗ	Арк.
										15
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата						

перенесенням матеріалу з однієї поверхні на іншу. Висока адгезійна здатність поверхонь взаємодіючих тіл є необхідною умовою для реалізації цього виду зношування.

Як правило, поверхневі забруднення, такі як адсорбовані молекули кисню, водяна пара, плівки оксидів металів та інші хімічні сполуки зменшують адгезію.

Однак високі контактні тиски можуть викликати пластичну течію в поверхневих шарах та руйнування поверхневих плівок. При цьому, якщо поверхнева текучість, що супроводжується видаленням окисних плівок, має місце в обох тілах (наприклад, їх твердості мало відрізняються один від одного), адгезійне зношування протікає більш інтенсивно.

При фрикційній взаємодії тіл, які характеризуються суттєво різною твердістю, часто реалізується інший механізм руйнування поверхні, званий абразивним зношуванням. При абразивному зношуванні нерівності твердішого тіла витісняють м'який матеріал з-під доріжки тертя рахунок його пластичного деформування (абразивне взаємодія двох тіл). Крім того, пластичні деформації можуть виникати і за наявності між тілами в зоні тертя твердих частинок зношування або абразиву (абразивна взаємодія трьох тіл).

Абразивне зношування може також виникнути при одноразовому навантаженні плями контакту, коли в активному шарі виникають високі внутрішні напруження. У цьому випадку тверді нерівності або частинки відіграють роль різця, що видаляє стружку з м'якого поверхні тіла. Такий вид абразивного зношування відомий як мікрорізання. Мікрорізання подібно до таких технологічних операцій як обробка напилком або абразивною шкіркою (взаємодія двох тіл), а також обробка поверхні шляхом притирання або полірування (взаємодія трьох тіл). Воно характеризується високою швидкістю зношування поверхонь.

У тому випадку, коли напруження в активному шарі не такі великі (наприклад, фактичні тиски не перевищують межу текучості) і немає сильної адгезії між поверхнями, руйнування при одноразовому навантаженні не

										Арк.
										16
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата						

6.273.180551.ПЗ

виникає. Однак, внаслідок циклічного характеру зміни напружень при відносних переміщеннях поверхонь і їх досить високих амплітудних значень (середній фактичний тиск, як правило, більше межі втоми) в активному шарі відбувається інтенсивне накопичення дефектів, що призводить до його руйнування втоми. Втомне зношування практично завжди має місце при фрикційному взаємодії поверхонь.

Експериментально встановлено, що при втомному зношуванні частинки відокремлюються з поверхні в дискретні моменти часу і розмір частинки порівнюємо з діаметром одиничної плями контакту.

Втомне зношування переважно має місце при пружному характері контактування. У той же час воно є супутнім за інших видів зношування (наприклад, при адгезійному та абразивному зношуванні).

2.2 Вплив технологічних факторів на службові властивості деталей

Враховуючи значну відмінність структури і властивостей основного металу та його приповерхневих шарів, необхідно окремо розглянути будову при поверхневого шару, яка є характерною практично для будь-яких видів експлуатації виробів.

Оскільки, згідно з [13], руйнування та зношування деталей починається з поверхні, найважливішим питанням міцності сучасного машинобудування є міцність приповерхневих шарів.

Саме від його будови залежить довготривала міцність деталей в різних умовах експлуатації (рис. 2.1).

Також розгляд структури приповерхневих шарів деталі, що складається із декількох шарів із «розмитою» границею між шарами, дозволяє схематизувати розгляд деформації та руйнування при терті матеріалів та виробів.

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

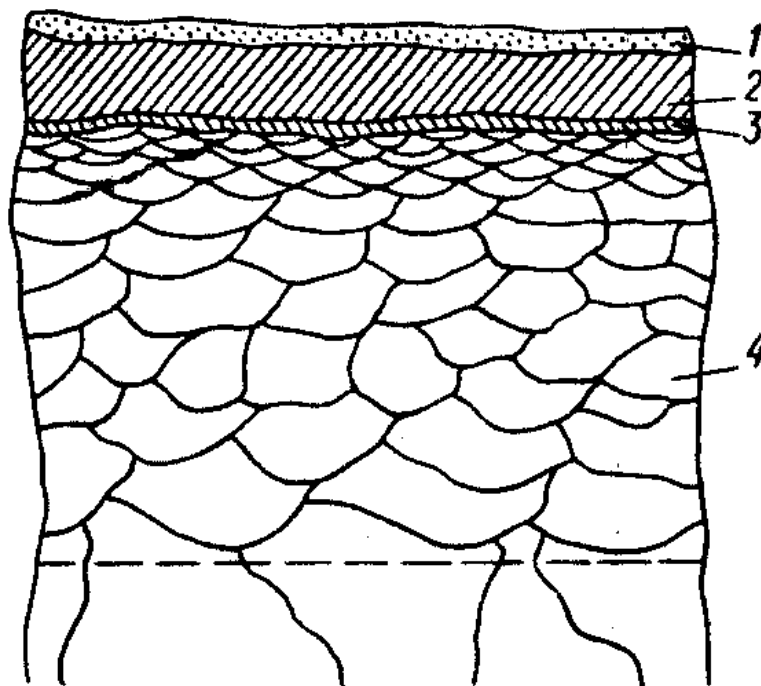


Рисунок 2.1 – Узагальнена будова структури приповерхнього шару виробу: 1 – приповерхнева зона (товщина порядку 1..10 мкм), що містить абсорбовані із навколишнього середовища молекули та атоми; 2 – зона товщиною 10^{-3} мкм, що являє собою продукт хімічної взаємодії металу з навколишнім середовищем, 3 – зона зі зміненою кристалічною структурою, що відмінна від основного металу, 4 – зона товщиною 0.01..0.1 мм зі зміненим фазовим і хімічним складом.

Розглянемо тепер основні причини підвищення інтенсивності зношування бандажів колісних пар [1].

Спочатку наведемо причини виникнення навантажень у місці контакту колеса і рейки:

- тиск рейки, що відповідає певній частині тиску на вісь колісної пари;
- динамічне навантаження від ударів від стиків;
- сили тертя, що виникають при коченні коліс по прямій ділянці колії та при проходженні кривих;
- сили тертя при гальмуванні, що виникають на поверхні дотику гальмівної колодки з колесом;
- сили тертя при буксуванні та русі загальмованого колеса юзом.

Тиск колеса на рейку призводить до стискаючих напружень в місці контакту, величина яких залежить від того, чи знаходиться колесо на прямому ділянці шляху, на кривому або на стику. Питомий тиск у місці стику досягає 500 МПа. Тертя кочення призводить до виникнення дотичних сил у місці контакту, що призводять до підвищення рівня напружень в поверхневому шарі колеса і до зносу, при цьому близько 75% витраченої на пластичну деформацію енергії перетворюється на тепло, яке концентрується в мікрооб'ємах, що примикають до поверхні зношування. Температура в цих локальних об'ємах може перевищувати критичні значення, що при швидкому охолодженні створює умови для протікання мартенситного перетворення, у процесі якого метал може розтріскуватися та відшаровуватися.

На поверхні кочення коліс спостерігаються викришування втомного характеру, що призводить до їх інтенсивного зношування. Питомі навантаження в зоні контакту середньої частини гребеня колеса та головки рейки досягають величини 3500 МПа, що викликає у місцях фактичного контакту напруження, що перевищують межу текучості металу. Про це свідчить пластичне деформування гребеня колеса (гострий накат).

Різноманітність умов експлуатації коліс висуває певні вимоги до металу, з якого мають виготовляти бандажі: висока міцність; втомна міцність; холодостійкість.

В даний час на колії 1530 мм випускаються бандажі колісних пар семи марок:

- Марки 1, твердість яких становить 248 НВ;
- Марки 2 - 269 НВ;
- марки 3 з підвищеною твердістю бандажу по поверхні катання зі сталі з вмістом ванадію 9% - 275 НВ, а твердість гребеня - 285 НВ;
- Марки 4 з використанням сталі з ванадієм 0,15-0,20%;
- Марки 5 із вмістом бору 0,001-0,005%;
- Марки 6 із вмістом ніобію 0,01-0,07%;

										6.273.180551.ПЗ	Арк.
											19
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата							

– Марки 7 із обробкою стали синтетичними шлаками, твердість яких становить 277 НВ.

Підвищений вміст вуглецю забезпечує необхідну зносостійкість і контактну витривалість, а також знижує термостійкість. Бандажна сталь, що використовується в даний час, не повній мірі відповідає перспективним умовам експлуатації. Для рухомого складу з високими осьовими навантаженнями особливо важливою є проблема зношування та контактної твердості. Метал повинен мати також задовільну термостійкість.

За останні роки під впливом різних факторів у конструкцію, технологію виготовлення та утримання верхньої будови шляху вводилися зміни, що вплинули на взаємодії колеса і рейки. Однак замість покращення ці зміни часто призводили до зростання зносу як коліс, так і рейок. Оскільки твердість колеса менша, ніж рейки, то колеса зношуються найбільш інтенсивно.

Можливими причинами інтенсивного зношування колісних пар рухомого складу та рейок є:

- зменшення поперечного розбігу колісних пар електровоза в рейковій колії внаслідок зменшення її ширини з 1524 до 1520 мм;
- порушення норм утримання шляху за шириною колії, рівнем та напрямом у плані;
- зміна жорсткості шляху внаслідок переходу на рейки важкого типу Р65, Р75, що мають підвищену жорсткість і змінену геометрію;
- масове застосування залізобетонних шпал;
- застосування об'ємно-загартованих рейок, твердість яких у 1,5 рази вища порівняно з твердістю коліс;
- зниження вимог щодо утримання шляху;
- зміна конструкції ходових частин локомотивів та збільшення їх потужності;
- погіршення утримання рухомого складу в експлуатації;
- погана якість мастила, що застосовується для лубрикації.

										6.273.180551.ПЗ	Арк.
											20
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата							

Встановити частку впливу кожної причини зносу неможливо, оскільки переважне значення тій чи іншій їх сумі змінюється у час їх участі. Тільки постійне спостереження, аналіз технічного стану локомотивів та шляхи можуть встановити причини та зменшити їх вплив на зношування.

Розглянемо також найбільш часті виходу із ладу колісних пар локомотивів.

Згідно з [1], найбільш частими причинами є: граничний знос гребенів колісних пар – 44 %; перевищення допустимої різниці діаметрів бандажів – 25,6 %; ослаблення посадки бандажів – 6,3%.

Інші причини показані на рис. 2.2.

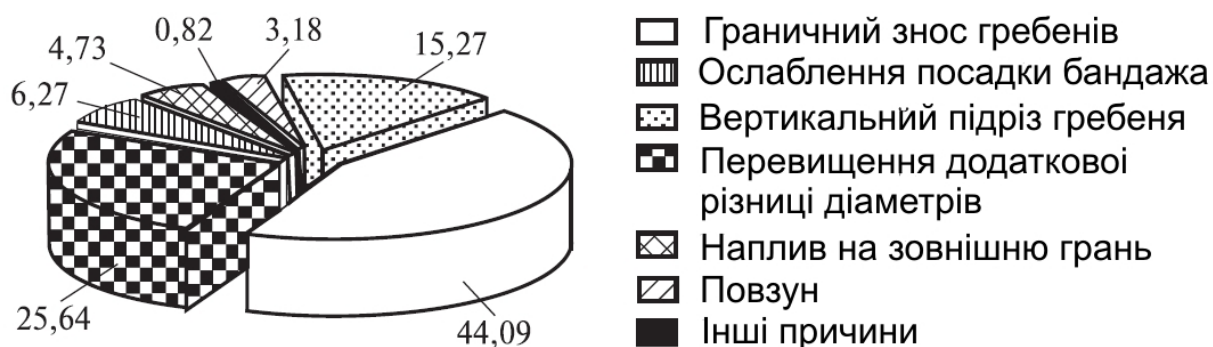


Рисунок 2.2 – Розподіл у процентах дефектів бандажів колісних пар локомотивів [1].

2.3 Висновки

1. Встановлено, що зношування бандажів колісних пар є складним та багатостадійним процесом, який залежить від багатьох факторів.
2. Показано, що визначальним для руйнування при терті є стан приповерхневих шарів, від яких довготривала міцність бандажів коліс.
3. Подані основні причини інтенсивного зношування колісних пар та представлені найбільш часті випадки, через які виходять із ладу колісні пари локомотивів.

3 СУЧАСНІ СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ КОЛІСНИХ ПАР

3.1 Аналіз технологій, які використовуються для підвищення довговічності пар тертя

На даний час існує достатньо багато технологій підвищення довговічності пар тертя [14].

Згідно [14], для підвищення довговічності деталей, що взаємодіють, застосовуються різні технологічні методи. До основних з них належать: термічна, хіміко-термічна, фізико-хімічна обробка робочих поверхонь деталей, поверхневе пластичне деформування (ППД), гальванічні покриття, металізація напилюванням і наплавлення поверхонь, електроерозійне легування (ЕЕЛ) та ін.

Основним завданням застосовуваних методів є підвищення якісних параметрів поверхневого шару: підвищення твердості і мікротвердості, зниження шорсткості, підвищення зносостійкості і відновлення зношених ділянок поверхонь, зміна величини і знака залишкового напруження, збільшення міцності від втомленості і т.п.

Розглянемо деякі найбільш поширені з них.

Поверхневе гартування. З метою отримання високої твердості в поверхневому шарі деталі зі збереженням в'язкої серцевини, що забезпечує можливість створення композиційного матеріалу, який поєднує в собі захисні властивості поверхні з механічною міцністю основи, застосовують поверхневе гартування або хіміко-термічну обробку.

Поверхневе гартування вигідно відрізняється від хіміко-термічної обробки значно меншою тривалістю процесу.

Незважаючи на велику різноманітність методів поверхневого гартування, усі вони передбачають нагрівання тільки поверхневого шару з подальшим гартуванням деталі. Існує кілька методів поверхневого гартування: у

										6.273.180551.ПЗ	Арк.
											22
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата							

розплавлених металах або солях, полум'ям ацетиленокисневого або газового пальника (так зване полум'яне гартування), в електролітах, променем лазера, електрострумом високої частоти.

Лазерна обробка. Дедалі більшого застосування для зміцнення деталей знаходить поверхнєве гартування при нагріванні лазером.

Лазер – пристрій, що використовує квантовомеханічний ефект вимушеного (такого, що стимулює) випромінювання для створення когерентного потоку світла. Промінь лазера може бути безперервним, з постійною амплітудою, або імпульсним, що досягає екстремально великих пікових потужностей.

Від моменту розробки лазер називали пристроєм, який сам шукає вирішувати завдання. Лазери застосовуються в найрізноманітніших сферах - від корекції зору до управління транспортними засобами, від космічних польотів до термоядерного синтезу. Лазер став одним із найбільш значущих винаходів ХХ століття.

Під дією лазерного випромінювання за короткий проміжок часу (10^{-3} – 10^{-7} с) поверхня деталі зі сталі або чавуну нагрівається до дуже високих температур. Поширення теплоти: вглиб металу здійснюється шляхом теплопровідності. Після припинення дії лазерного випромінювання відбувається гартування нагрітих ділянок завдяки інтенсивному відведенню теплоти (самозакалювання). Швидкість охолодження становить 103-105 °C/с.

Лазерне термозміцнення поверхні деталі є перспективним процесом, що створює низку можливостей підвищення експлуатаційних якостей деталей машин та інструменту.

Зміцнення поверхні деталей з використанням променя оптичних квантових генераторів характеризується певними перевагами порівняно з іншими видами зміцнення. До цих переваг можна віднести:

■ можливість високопродуктивного зміцнення локальних ділянок деталей у місцях, оброблених лазерним випромінюванням поверхні

									Арк.
									23
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата					

6.273.180551.ПЗ

(приблизно на 20% вище за твердість при термообробці за традиційною технологією), і обумовлена цим висока зносостійкість;

- можливість зміцнення важкодоступних ділянок деталей шляхом введення променя лазера через вікна та отвори;

- відсутність деформації деталі й можливість обробки без збільшення шорсткості, що дозволяє виключити фінішну механічну обробку;

- можливість створення "плямистого" поверхневого шару і шару з регулярним візерунком зміцнення, що забезпечує гарні умови мащення поверхонь, які труться, їх приробітку;

- висока продуктивність процесу, короткий час перебування деталі на обробці.

Нині лазерна термообробка базується на використанні як імпульсних, так і потужних CO₂-лазерів безперервної дії. На практиці найбільш широкого застосування набув спосіб (високочастотне гартування) при нагріванні поверхневого шару деталі індукційним змінним струмом високої частоти (СВЧ). Основні переваги методу: можливість контролювати глибину загартованого шару від часток міліметра до 10 мм і більше, мінімальне викривлення, висока продуктивність.

Індукційне нагрівання відбувається внаслідок теплової дії струму, що індукується у виробі, поміщеному в змінному магнітному полі.

Хіміко-термічна обробка. Процеси, що відбуваються з дифузійним насиченням поверхні сталі різними елементами і зумовлюють зміну хімічною складу поверхневого шару сталевого виробу, називають хіміко-термічною обробкою (ХТО).

ХТО - один з ефективних методів, спрямований на збільшення опору тертю і зношуванню деталей (зокрема, інструменту) шляхом створення на їх поверхнях шарів хімічних сполук, властивості яких відрізняються від властивостей основних металів. У даному випадку зносостійкість виробу підвищується внаслідок того, що між металами, які входять до складу поверхневого шару, утворюються сполуки з Карбоном, Нітрогеном,

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

Сульфуром та іншими хімічними елементами з V, VI, VII груп періодичної системи Д.І. Менделєєва. Ці методи обробки, що дістали назви: цементация, азотування, ціанування, борування, хромування та інші - останнім часом набувають дедалі більшого застосування для поліпшення протизадирних і антифрикційних властивостей деталей.

ХТО порівняно з поверхневим гартуванням, наприклад СВЧ, має певні особливості й переваги (поступаючись поверхневому гартуванню в продуктивності):

1) незалежність від зовнішньої форми виробу. З однаковим успіхом можна обробляти і прості, і складні за формою вироби, отримуючи по всій поверхні зміцнений шар однакової товщини, що не завжди можливо при поверхневому гартуванні;

2) більша відмінність між властивостями серцевини і поверхні, ніж при поверхневому гартуванні. За ХТО відмінність у властивостях визначається особливостями будови і складу, а за поверхневого гартування - тільки будови;

3) наслідки перегрівання поверхні можуть бути усунені подальшою термічною обробкою, тоді як при поверхневому гартуванні перегрівання не може бути усунене, оскільки воно є останньою операцією.

Застосовуючи ХТО, деталь звичайно поміщають середовище, багате на елемент, що дифундує в метал.

Активність, середовища, що насичує, залежить від його складу середовища, температури і тиску, а також складу сталі.

*Цементация*ю називається обробка, пов'язана з поверхневим насиченням сталі вуглецем. При азотуванні проводиться дифузійне насичення азотом. Комбіноване насичення вуглецем і азотом проводиться при нітроцементации. *Борування* сталі полягає в насиченні поверхневого шару бором. Насичення сталі металами має назву дифузійної металізації. Залежно від металу, що насичує, розрізняють процеси алітування (насичення алюмінієм), силіціювання (кремнієм), вольфрамуювання (вольфрамом) і т. ін. На практиці

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

найбільшого застосування в машинобудуванні набули процеси: цементації, азотування, борування, алітування і дифузійного хромування.

Азотування. Азотуванням називають дифузійне насичення азотом поверхонь сталевих деталей. Після азотування деталі трохи збільшуються в розмірах. Процес азотування здійснюють за температури 500-600 °С на готових деталях, що пройшли остаточну термообробку, і доводять до остаточного розміру поліруванням або шліфуванням. З легуючими елементами деталей (Хромом, Молібденом, Ванадієм і Алюмінієм) азот утворює твердий і стійкий нітрид. Найбільшу твердість шару, що азотується, додає легуючий елемент деталей - Алюміній.

Унаслідок наявності в азотованому шарі залишкового напруження стискування межа витривалості деталей значно підвищується, причому опір втомі є тим вищим, чим товщий азотований шар.

Азотуванню піддаються вироби, від яких вимагається висока зносостійкість і мікротвердість поверхневого шару, підвищена циклічна міцність, а також стійкість до корозії.

Останнім часом значного поширення набув процес азотування іонізованим азотом у плазмі тліючого розряду — іонне азотування (ІА). Спосіб іонного азотування полягає в обробці деталі або інструменту потоком іонів азоту. У результаті останні проникають на контрольовану глибину до

Загальна товщина дифузійного шару досягає 0,4...1,0 мм, причому шар в кілька мікрон складається тільки з нітриду заліза і має максимальну твердість. Іонне азотування проводять у розрідженій азотовмісній атмосфері з підключенням виробів, що азотуються, до негативного електроду (катоду). Анодом є контейнер установки печі. Між катодом (виробом) і анодом збуджується тліючий розряд. Іони газу, бомбардуючи поверхню виробу, нагрівають її до температури насичення. Для отримання: нітридних покриттів використовують установку, оснащену герметичною камерою, через яку прокачується суміш азот з вонем, причому відношення N₂/H₂ коливається в межах 0,5-2,0. Необхідна чистота потоку іонів становить 90%.

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

Борування. Борування - процес дифузійного насичення поверхні металу сполуками бору у вигляді бориду заліза Fe_2B і FeB . Застосовують для підвищення зносостійкості виробів, зокрема тих, що працюють при підвищених або знижених температурах, знакозмінних і ударних навантаженнях або в агресивних і абразивних середовищах. Боруванню можуть піддаватися будь-які марки сталей, його проводять у суміші порошків, паст, газів або в розплаві солей, що мають у своєму складі бор.

Борування переважно використовується для зміцнення металевих поверхонь, що працюють на стирання: металорізальних інструментів зі швидкорізальних сталей, штампового інструменту, прес-форм, деталей дробильних машин, жолобів грохотів і деталей, що працюють за температури 500-850 °С.

Борування доцільно проводити у вакуумних печах або печах із захисною атмосферою. У результаті борування можлива зміна розмірів деталі. Тому при виготовленні точних і високоточних деталей доцільно їх обробку виконувати в такій послідовності:

- попередня механічна обробка;
- поліпшення (гартування і низький відпуск за режимами відповідних марок сталей);
- механічна обробка з припуском на доведення;
- борування або хромування, термічна обробка для забезпечення необхідного комплексу властивостей основного металу;
- остаточне доведення розмірів зміцнених деталей методами механічної обробки (шліфування, полірування).

Дифузійне хромування. Дифузійне хромування - процес насичення поверхні металу хромом і його сполуками.

Процес дифузійного хромування може використовуватися для підвищення жаро-, зносо-, Кавітаційної і корозійної стійкості деталей машин та інструменту в машинобудівній, хімічній, приладобудівній й інших галузях промисловості. Хромовані вироби до температури 800 °С характеризуються

						6.273.180551.ПЗ	Арк.
							27
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата			

підвищеною окислювальною здатністю. Процес хромування придатний для будь-яких марок сталей. Його проводять у високотемпературних печах. Твердість хромованого шару підвищується зі збільшенням вмісту Карбону і може досягати HV 1300 за глибини шару близько 0,3 мм.

Сульфідкування. Процес насичення поверхневих шарів металу Сульфуром називають сульфідкуванням.

Сульфідують технологічне оснащення, виготовлене зі швидкорізальної сталі і сталей типу ХВГ, 9ХС, з метою збільшення антифрикційних властивостей поверхонь. Як устаткування для сульфідують: застосовують ванни тиглів. Технологічне оснащення, що надходить на сульфідують, заздалегідь знежирюють.

Сульфідують здійснюють у рідкому, твердому або газовому середовищі. Воно може бути низько-, середньо- і високотемпературним. Відповідно, температурні режими становитимуть 150-450, 540-580 і 850-950 °С.

Ефективність сульфідують полягає в тому, що сульфідна плівка, яка має меншу міцність, ніж основний метал, легко руйнується при терті і відділяється від основи, запобігаючи захопленню поверхонь тертя. У процесі зношування Сульфур дифундує вглиб металу і з тим більшою інтенсивністю, чим вищим є тиск у парі тертя. Таким чином, антифрикційні властивості сульфідного шару зберігаються за величини зносу, що значно перевершує первинну товщину шару.

Сульфідують піддають: поршні, втулки, поршневі кільця, сталеві підшипники ковзання, гайки ходових гвинтів, деталі рухомих частин, змазування яких утруднене.

Недоліками методу є значне збільшення шорсткості поверхні та збільшення розмірів деталі. Крім того, сульфідують не може служити засобом захисту від корозії.

Епіламування. Епіламування — це процес нанесення поверхнево-активної речовини з вмістом фтору (ФТОР-ПАВ) – епілама на поверхню

									6.273.180551.ПЗ	Арк.
										28
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата						

твердого тіла, унаслідок чого на обробленій поверхні утворюється спеціальне захисне покриття у вигляді мономолекулярної плівки.

На оброблюваній поверхні під час епіламування формується шар орієнтованих молекул, які перешкоджають розтіканню масла із зони тертя.

Відновленням деталей металопокриттями. Одним зі шляхів поліпшення якості поверхневого шару й зниження вартості ремонту машин є багаторазове відновлення форми деталей металопокриттями і забезпечення їхньої взаємозамінності. Метод нанесення металопокриттів можна поділити на наплавлення, гальванопокриття і металізацію напилюванням.

Наплавлення відрізняється від інших способів відновлення тим, що ним можна в широких межах змінювати хімічний склад наплавленого шару, а головне - необмежено нарощувати метал.

Недоліками методу є: утворення тріщин, жолоблення, висока пористість, наявність жужільних включень, зниження її міцності від втомленості та ін.

Гальванопокриття (хромування, нікелювання, залізнення та ін.) застосовують для деталей зі зношуванням від декількох мкм до 1,5 мм.

Хромування як процес відновлення і підвищення зносостійкості поверхонь тертя посідає одне з перших місць. Покриття з електролітичного хрому мають високу твердість, що пояснюється, головним чином, дрібнозернистою структурою й особливістю кристалізації його на катоді. Залежно від умов електролізу твердість хромового покриття може змінюватися від 500 до 1200 за Віккерсом. Найбільш тверді осад хрому значно перевищують за твердістю звичайні конструкційні матеріали і в 1,5 рази вище від твердості сталі, що азотується.

Дані про міцність осажденного хрому можна одержати на підставі ряду характеристик, до яких варто віднести: міцність зчеплення з основним металом деталі, тимчасовий опір розриву, здатність покриття протидіяти питомим тискам і динамічним навантаженням.

У результаті застосування ретельного механічного очищення поверхні і подальшого анодного активування в хромованому електроліті одержують

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

міцність зчеплення хромового покриття зі сталлю вище міцності хрому. При різних методах випробувань відбувається руйнування хрому, а не відшаровування покриття від основного металу по межі хром-сталь.

Тимчасовий опір хрому розриву зменшується при збільшенні товщини шару покриття. При хромуванні товщина робочою покриття повинна дорівнювати величині припустимого для даної деталі зношування.

Висока твердість, низький коефіцієнт тертя і хімічна стійкість електролітичного хрому сприяють його високій зносостійкості.

Недоліки методу: погана припрацьовуваність і змочування маслом, зниження опору втоми.

Металізація напилюванням полягає в розпиленні розплавленого металу струменем стисненого повітря і осадженні його на попередньо підготовлену поверхню деталі. Як матеріал, що напилюють, застосовують дріт зі сталі, бронзи, латуні, алюмінію та ін. Для кращого зчеплення частинок, які наносяться, з підлогою збільшують шорсткість відновлюваної поверхні.

Незважаючи на те що процес металізації напилюванням відрізняється простотою й продуктивністю, метод має істотні недоліки: висока пористість (до 10%), зниження опору втоми, слабе зчеплення матеріалу, що наноситься, з підлогою, незадовільна робота в умовах тертя без змащення та ін. Застосовується для відновлення шийок валів, колінчастих валів, вкладишів підшипників і т.п.

Електроерозійне легування (ЕЕЛ). Для зміцнення і нанесення захисних покриттів досить перспективним є метод ЕЕЛ. Технологічна сутність ЕЕЛ полягає в перенесенні легуючого матеріалу анода на поверхню, яка легується при іскровому розряді в повітряному середовищі. Перенесений матеріал анода легує катод і, з'єднуючись хімічно з атомарним азотом повітря, вуглецем і матеріалом виробу, що зміцнюється, утворює на поверхні останнього дифузійний зносостійкий шар. Завдяки значній кількості металів, які можна використовувати при ЕЕЛ, участі міжелектродного середовища в процесі формування поверхневих шарів цим методом можна в широких

									6.273.180551.ПЗ	Арк.
										30
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата						

межах змінювати механічні, термічні, електричні, термоємисійні й інші властивості робочих поверхонь деталей.

До основних особливостей ЕЕЛ слід віднести:

- локальну обробку поверхні;
- високу міцність зчеплення нанесеного матеріалу з основою;
- відсутність нагрівання деталі в процесі обробки;
- можливість використовувати як оброблювальні матеріали, чисті метали, так і їхні сплави, металокерамічні композиції, тугоплавкі сполуки і т.п.;
- дифузійне збагачення поверхні катода (деталі) складними елементами анода (електрода) без зміни розмірів деталі;
- відсутність необхідності спеціальної підготовки поверхні. Необхідне устаткування малогабаритне, надійне і транспортабельне.

Недоліками методу є: зниження шорсткості поверхні, виникнення в поверхневому шарі залишкового напруження, що розтягують, зниження міцності від втомленості.

У процесі ЕЕЛ на поверхні анода та катода утворюється шар зміненої структури, який при впливі на нього протравлювачів, використовуваних: для виявлення мікроструктури матеріалів електродів, залишається «білим», тобто структура його не виявляється. Подібні шари спостерігалися на поверхнях матеріалів, що піддавалися шліфуванню, фрезеруванню., електромеханічній обробці, обробці дробом, на поверхнях тертя після впливу висококонцентрованих потоків енергії. Загальним для всіх зазначених випадків є те, що утворення «білих» шарів відбувається в умовах локальної дії високих температур і тисків. За інтенсивністю впливу на поверхневий шар ЕЕЛ значно відрізняється від зазначених вище процесів (тиск ударної хвилі 0,1 Па, температура $5-40 \times 10^3$ °С). Висока швидкість відведення тепла призводить до того, що в межах товщини шару порядку декількох мікрометрів температура швидко падає до температур плавлення та відповідних фазових перетворень. У зв'язку з цим кристалізація, фазові

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

перетворення, дифузія та хімічна взаємодія, що супроводжує процес ЕЕЛ, призводять до утворення досить нерівноважних структур з дрібним зерном, високою гетерогенністю за складом, структурою та властивостями.

3.2 Підвищення експлуатаційних властивостей поверхні кочення коліс висококонцентрованими джерелами енергії

Згідно із відкритими джерелами, зокрема [15], однією із перспективних технологій поверхневого зміцнення є плазмове поверхнєве зміцнення.

Багато прикладів, коли поверхнєве зміцнення висококонцентрованими потоками енергії дугової плазми в десятки разів підвищує час життя деталей та виробів, що працюють в екстремальних умовах, причому за відносно невисоку ціну. В основі застосування даного методу лежить проста ідея: тільки за рахунок оптимального термічного циклу модифікувати матеріал поверхневого шару найбільш напруженої робочої ділянки деталі та надати йому здатність найефективнішим чином протистояти навантаженням.

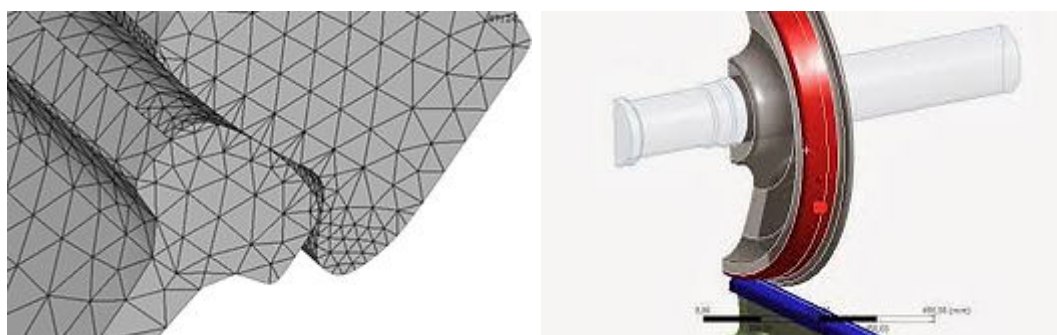


Рисунок 3.1 – Трибосистема колесо-рейка

Залізничні колеса є одним з основних та найбільш навантажених елементів ходової частини залізничного рухомого складу, що безпосередньо взаємодіють з шляхом. Під впливом нерівностей верхньої будови колії колісна пара робить складні просторові переміщення, а в кривих колесо проковзує по рейці і виникають значні поперечні сили між гребенем колеса і робочою гранню зовнішньої рейки. Це призводить до підвищеного бокового зносу рейок і гребенів коліс, порушення геометрії, відповідно до скорочення термінів служби та збільшення витрат на їх експлуатацію. У мережі залізниць

						6.273.180551.ПЗ	Арк.
							32
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата			

за умови несприятливої зміни умов експлуатації відзначаються спалахи катастрофічного зносу гребенів коліс та бічних поверхонь рейок. Глибинні причини цього явища однозначно не розкриті, оскільки проблема бокового зносу загострюється при неконтрольованій зміні цілого ряду параметрів колії та рухомого складу. Для відновлення стандартного профілю в процесі ремонту колеса переточують, але при цьому зменшується радіус колеса, підвищуються контактні напруження і тим самим знижується його ресурс. Разом з цим на поверхню катання після переточування виходять шари металу з меншою твердістю.

Зупинимося на практичному аспекті проблеми з використанням нових можливостей плазмових технологій.

На даний час технологія плазмового поверхневого зміцнення є радикальним способом найбільш швидкого та дешевого вирішення проблеми як підвищеного зносу, так і зниження прямих експлуатаційних витрат залізниць. Очевидно, що повні втрати, які є наслідком підвищеного зносу пари колесо/рейка, будуть значно вищими. Зростаючий люфт між колесом і рейкою в русі призводить до зростання навантажень на деталі візка та кузова. Темп зношування всіх пов'язаних вузлів підвищується, а міжремонтний період знижується. Таким чином, встановлюється міцнісна рівновага. Змістити її у бік зниження експлуатаційних витрат залізниці з таким безкоштовним доповненням, як підвищення комфорту для пасажирів, можна підвищити час життя дорогих та відповідальних деталей, та виключивши зайві ремонтні роботи.

Щодо безкоштовного доповнення до даної технології, то підвищення комфорту є прямим наслідком зниженого зношування.

Серед інших методів поверхневого зміцнення високо концентрованими джерелами енергії (лазерне або електронне опроміння, високочастотне індукційне нагрівання) – плазмове є найпростішим, дешевим, доступним і продуктивним.

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

Він легко можна реалізувати на ремонтних підприємствах. Але із застереженням, що призначення правильних режимів загартування для кожної деталі може зробити лише висококваліфікований спеціаліст. Процес легко автоматизується, що гарантує повторюваність та виключає людський фактор.

3.3 Висновки

1. Поданий перелік найбільш часто застосовуваних технологій інженерії поверхні, які підвищують довговічність пар тертя.

2. Показано, що однією із найперспективнішою технологією для підвищення довговічності контактної пари колесо-рейка є технологія плазмового зміцнення.

3. Представлені як переваги, так і недоліки даної технології, та показано, що реалізація даної технології на підприємствах достатня легка, але виникає потреба для кожної конкретної деталі використання технологічного обґрунтування висококваліфікованим спеціалістом.

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

4 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ КОЛІСНИХ ПАР ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛАЗМОВОГО ЗМІЦНЕННЯ

4.1 Побудова математичних співвідношень для встановлення оптимальних параметрів структури бандажів колісних пар

Для побудови математичних співвідношень для встановлення оптимальних параметрів структури бандажів колісних пар запропонуємо наступну постановку задачі.

Однією із причин зношування є втрата міцнісних параметрів локальних об'ємів у матеріалі поверхневих шарів. Дане явище в літературі називається втратою контактної міцності [16].

Тому для вирішення задачі забезпечення максимального підвищення контактної зносостійкості деталі пар тертя при роботі в умовах переважаючих силових навантажень запропонуємо наступне математичне формулювання [16]:

1. Нехай досліджуване тіло (деталь) займає область простору X , поверхню тіла позначимо ∂X .

2. Поверхню тіла представимо у вигляді сукупності множин, яких задані різні види навантаження: $\partial X = \partial X_1 \cup \partial X_2 \cup \partial X_3$, де ∂X_1 - область тіла, у якій задані силові навантаження, ∂X_2 - область тіла, із заданими обмеженнями по переміщенню, ∂X_3 - ненавантажена поверхня.

3. На кожній з елементарних під областей ∂X_1^i заданий силовий вектор \vec{F}_1^i , а на ∂X_2^i заданий вектор переміщень \vec{u}_2^j , які в ∂X мають такі розподіли $\vec{F}_1^i = \vec{F}_1^i(x), \vec{u}_2^j = \vec{u}_2^j(x), x \in \partial X$.

4. При розгляді механічних властивостей досліджуваної деталі обмежимося такими її параметрами як модуль пружності E , коефіцієнт

									Арк.
									35
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата					

6.273.180551.ПЗ

Пуассона μ та межа міцності σ^* , функціональний розподіл яких в області X відповідає: $E = E(x), \mu = \mu(x), \sigma^* = \sigma^*(x), x \in X$.

5. В результаті в деталі формується напружений стан, який характеризується в кожній точці тензором $\hat{\sigma} = \hat{\sigma}(x), x \in X$.

6. Оскільки напруження, що виникають у тілі, однозначно не визначають експлуатаційні параметри конструкцій, для аналізу контактної міцності використовуємо вираз:

$$k(x) = 1 - \frac{\sigma_m(x)}{\sigma^*(x)}, \quad (4.1)$$

де $\sigma_m(x)$ - еквівалентне представлення тензора напруги у формі Мізеса, $\sigma^*(x)$ - міцнісні властивості матеріалу у точці.

Величину $k(x)$ назовемо коефіцієнтом запасу контактної міцності у приповерхневих шарах.

7. Величина $k(x)$ змінюється в інтервалі $[-\infty; 1]$, при $k(x) = 1$ - у точці тіла відсутнє знеміцнення, при $k(x) \leq 0$ - у точці тіла пройшло знеміцнення.

8. Завдання підвищення контактної міцності та зносостійкості за допомогою оптимізації внутрішнього розподілу механічних властивостей зводиться до пошуку таких функцій $E(x), \mu(x), \sigma^*(x)$, які при заданих $\bar{u}_i(x)$ і $\bar{F}_i(x)$, забезпечують відповідність функціоналу (4.1) умові (4.2):

$$L = \dim_{x \in V} (k(x) \leq 0) \rightarrow 1, \quad (4.2)$$

де $\dim(\dots)$ - розмір області, що задовольняє заданій умові.

									Арк.
									36
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата					

4.2 Розрахунок і обґрунтування глибини зміцненого шару

При написанні даного розділу були використані в тому числі результати роботи [16] з дозволу авторів.

Для встановлення оптимальних параметрів структури поверхневих шарів розглянемо математичну модель у двовимірній постановці задачі.

В якості об'єкту дослідження розглянемо двовимірне прямокутне тіло з функціонально-градієнтними властивостями по глибині, яке знаходиться на жорсткій основі.

В області контактної взаємодії розглянемо параболічний розподіл нормальної складової навантаження, зв'язок між нормальним і дотичним вектором навантаження підпорядковується закону Кулона:

$$T_2(x) = \beta(x)T_1(x), \quad (4.3)$$

де $T_1(x)$ - нормальна складова вектора навантаження, $T_2(x)$ - дотична складова вектора навантаження, $\beta(x)$ - Коефіцієнт тертя (рис. 4.1).

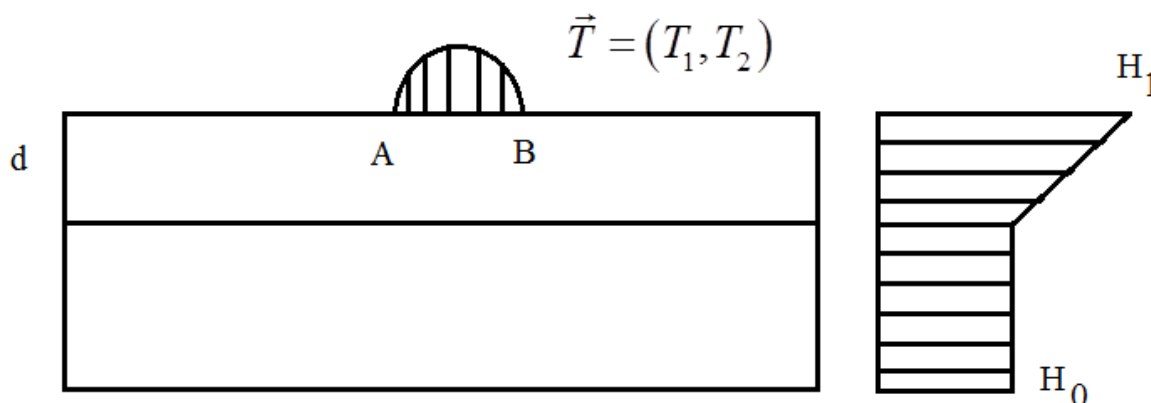


Рисунок 4.1 – Об'єкт дослідження: АВ – пляма контакту (області контактної взаємодії), $\vec{T} = (T_1, T_2)$ - вектор навантаження, d - товщина зони зміцнення, H_1 - значення мікротвердості на поверхні, H_0 - значення мікротвердості в глибині матеріалу

Як базову характеристику розподілу механічних властивостей матеріалу приймемо величину мікротвердості, яка характеризує відгук елемента локального обсягу із заданим структурно-енергетичним станом на зовнішні дії.

Було встановлено, що безпосередньо на поверхні бандажа локомотивного колеса внаслідок плазмового зміцнення мікротвердість за Віккерсом становить $H_1 = 3900$ МПа, вихідна мікротвердість $-H_0 = 2600$ МПа, яка виявляється на глибині $d = 2$ мм від поверхні, величину вихідного силового навантаження прийняли рівною $10 \cdot 10^4$ Н, а коефіцієнт тертя ($\beta(x)$) – 0.25.

В результаті, за допомогою вільного для доступу пакету скінчено-елементного аналізу Fenics було встановлено наступне розподілення напружень в досліджуваному фрагменті конструкції (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Розподіл напружень у формі Мізеса в досліджуваній конструкції, 10^9 Па

Аналіз отриманих результатів (рис. 4.2) показав, що найбільше значення напруг виникає у безпосередньо в області контактної взаємодії. При віддаленні від зони контакту значення напруги зменшуються, що дозволяє говорити про те, що саме поведінка поверхневих зон в області контактного навантаження є визначальним при роботі деталей в умовах тертя.

Оскільки напружений стан однозначно не визначає параметри міцності об'єкта, в якості характеристики його експлуатаційних властивостей прийємо зміцнення конструкції відповідно до співвідношення (4.2) – рис. 4.3.



Рисунок 4.3 – Розподіл величини знеміцнення конструкції у тілі

Встановлено, що найбільші втрати трибологічної контактної міцності спостерігаються безпосередньо в зоні контактної взаємодії (рис. 4.3).

Важливим щодо роботи конструкції є її оптимізація для різних умов експлуатації, тобто знаходження таких розподілів напружено-деформованого стану, за яких забезпечується підвищення її надійності.

Як критерій оптимізації виберемо функціонал (4.2), а під керуючим параметром будемо розглядати товщину зміцненого шару d .

Для знаходження оптимальних режимів плазмового зміцнення колісних пар значення розміру області контакту АВ розглядатимемо рівною 13 мм.

Прийємо, що величина вертикальної складової навантаження має такі дискретні значення $10 \cdot 10^4$ Н та $12.5 \cdot 10^4$ Н (навантаження на колесо в залежності від типу локомотива), а значення коефіцієнта тертя дискретні значення 0.06, 0.22, 0.5, що відповідає найбільш поширеним умовам експлуатації реальної фрикційної системи колесо-рейка.

Величину d змінюватимемо від 0 до 10 мм.

						6.273.180551.ПЗ	Арк.
							39
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата			

В результаті отримаємо наступну залежність максимальної зони розміщення (значення функціоналу (4.2)) від параметра d (рис. 4.4, 4.5) для різних величин нормального навантаження ($T_1(x)$) та коефіцієнта тертя ($\beta(x)$).

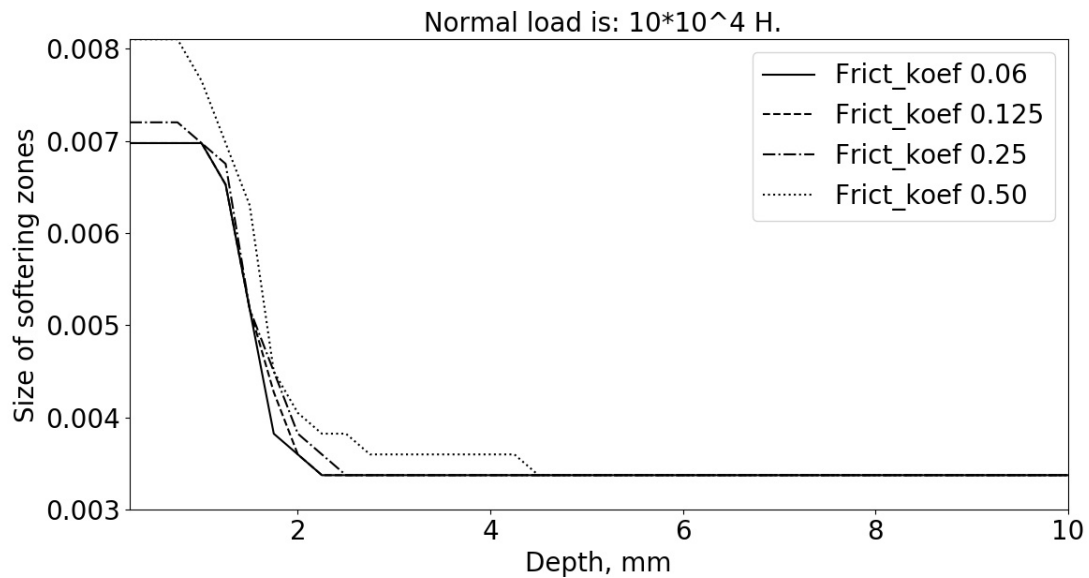


Рисунок 4.4 – Значення величини знеміцнення для нормального навантаження $10 \cdot 10^4$ Н.

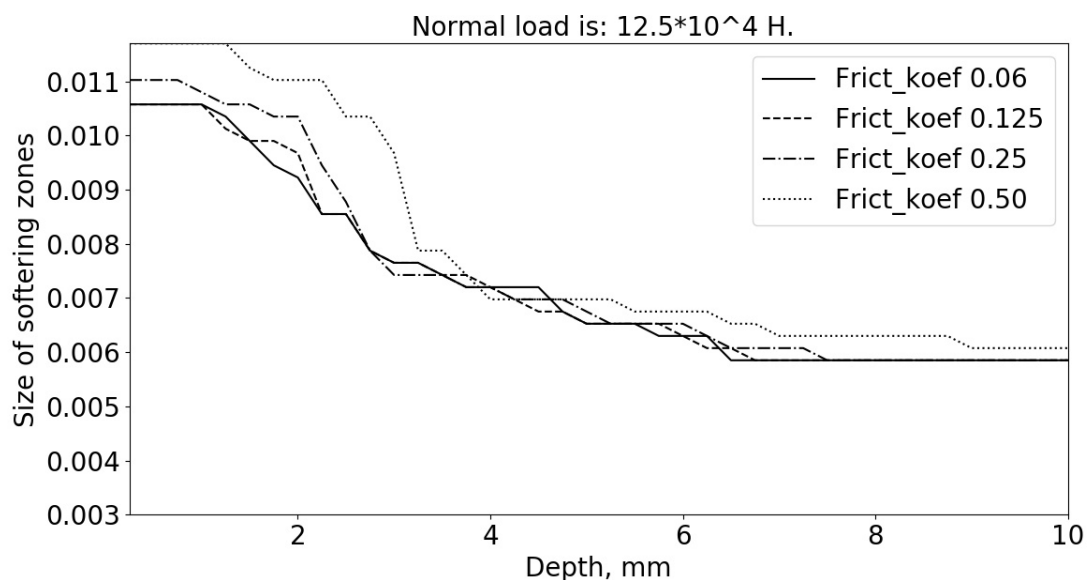


Рисунок 4.5 – Значення величини знеміцнення для нормального навантаження $12.5 \cdot 10^4$ Н.

4.3 Висновки

1. Розглянута постановка задачі, яка дозволяє обґрунтовувати оптимізацію однієї із найбільш поширеної технологій інженерії поверхні, що використовується на залізничному транспорті, - технології плазмового зміцнення.

2. З використанням сучасних розрахункових технік, був проведений аналіз напружено-деформованого стану фрагменту колеса модифікованого плазмовим зміцненням.

3. Встановлено оптимальну глибину зміцнення колеса, глибше за яку не доцільно проводити обробку конструкції, оскільки це не призведе до суттєвого підвищення міцнісних параметрів колеса, але вимагатиме більше енергетичних затрат.

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз нормативних документів, які регламентують функціонування бандажів колісних пар локомотивів і встановлено, що питання зносостійкості бандажів колісних пар, особливо при неоднорідності хімічного стану матеріалу, механічних властивостей є відкритими та важливим для сучасного стану розвитку тягового рухомого складу.

2. Подані основні сучасні уявлення, що описують тертя та зношування колісних пар, і показані основні випадки, через які виходять із ладу колісні пари локомотивів.

3. Наведено перелік найбільш часто застосовуваних технологій інженерії поверхні, які підвищують довговічність пар тертя, та показано, що однією із найперспективнішою технологією для підвищення довговічності контактної пари колесо-рейка є технологія плазмового зміцнення.

4. З використанням сучасних підходів механіки встановлено оптимальну глибину зміцнення бандажа колеса, глибше за яку не доцільно проводити обробку конструкції, оскільки це не призведе до суттєвого підвищення міцнісних параметрів колеса, але вимагатиме більше енергетичних затрат.

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		

15. Интернет-джерело «Топаз - Оборудование плазменного упрочнения гребней колёс и рельс». Режим доступа: <https://www.thalamus-topas.com/topas-koleso>

16. Kopylov V., Kuzin O., Kuzin N. Application of computational mechanics approaches for increasing of tribosystem operational parameters by using plasma hardening method// Journal Applied Mathematics and Computational Mechanics. – 2021. – V.20, Issue 1. – p.61-70.

					6.273.180551.ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ документів	Підпис	Дата		