

**МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

МИХАЛІЧЕНКО ПАВЛО ЄВГЕНОВИЧ

УДК 629.4.027.115-192

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ БУКСОВИХ ВУЗЛІВ
РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ**

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

**АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Дніпропетровськ – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теоретичних основ електротехніки Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Міністерства транспорту та зв'язку України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
КОСТИН Микола Олександрович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Міністерства транспорту та зв'язку України,
завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ТАРТАКОВСЬКИЙ Едуард Давидович,
Українська державна академія залізничного транспорту
Міністерство транспорту та зв'язку України, м. Харків,
завідувач кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу.

кандидат технічних наук, доцент
ДОВБНЯ Микола Петрович
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Міністерство транспорту та зв'язку України
доцент кафедри локомотиви

Провідна установа: Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля, кафедра транспортних технологій
Міністерство освіти і науки України, м. Луганськ.

Захист відбудеться 14.04.2006 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Акад. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Автореферат розісланий 10.03.2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., проф.

Жуковицький І.В

ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

Актуальність теми. На сьогоднішній день на залізницях України експлуатуються 197 тис. одиниць рухомого складу, у т. ч. 1848 електровозів, 2947 магістральних та маневрових тепловозів, 1472 секцій електропоїздів, 9022 пасажирських та 186374 вантажних вагонів.

Рівень зносу усього рухомого складу залізниць складає ~57 %, що є наслідком політичних зрушень та економічної кризи в Україні в 90-х рр. Оскільки в цей період історії залізничного транспорту не було поповнень новими сучасними електровозами, тепловозами, вагонами та секціями моторвагонного рухомого складу, ступінь зносу електровозів досягла ~82 %, тепловозів та електропоїздів ~72 % та ~60 % для вагонів. І хоча темпи закупівлі за кордоном та виготовлення власного рухомого складу останніми роками прискорено, але це однак не дозволяє вивести з експлуатації рухомий склад, що виробив свої ресурси. Тому Укрзалізниця і далі вимушена використовувати існуючий достатньо зношений рухомий склад для перевезення вантажів та пасажирів, одночасно вирішуючи питання безпеки руху.

Важливе місце у питанні надійності експлуатації та безпеки руху будь-якої одиниці рухомого складу посідає експлуатація і ремонт колісної пари, яка є однією з головних та найвідповідальніших частин рухомого складу. В значній мірі безпека руху потягів залежить від конструкції, матеріалів, технології виготовлення та ремонту колісної пари, а також якості їх огляду. В той же час, кількість заходів на позаплановий ремонт з причин пошкодження колісної пари займає друге місце після пошкоджень тягового двигуна і складає в середньому 21...23 % від усіх позапланових ремонтів. При цьому більший відсоток належить пошкодженню буксових роликів підшипників.

На рухомому складі залізниць завдяки своїй простоті конструкції, технології виготовлення та високій надійності в системі буксового вузла „шийка колісної пари – внутрішнє кільце підшипника кочення” використовується так зване з’єднання з гарантованим натягом. В процесі експлуатації та з ряду технологічних причин натяг вищезазначеного з’єднання зменшується, а то й зовсім втрачається. Результати аналізу випадків заходів рухомого складу до позапланового ремонту в депо показують, що відсоткове співвідношення заходів по послабленню натягу від загальної кількості пошкоджень буксового вузла за період 1998-2003 рр., склало (%): 54,5; 75; 80,8; 42; 35,7; 31 відповідно рокам. За даними технічного аналізу, наприклад, лише по Придніпровській залізниці, кількість випадків псувань і позапланових ремонтів по послабленню натягу за 2004 р. склало 12 випадків на 1млн. км. пробігу.

Для підкреслення суттєвої важливості надійної роботи зазначеного з’єднання наведемо такий неприємний приклад. 10 листопада 1999 року о 6.05 годині на ділянці Олександрія – Королінки Одеської залізниці на швидкості 50 км/год відбулося сходження напіввагона вантажного потяга з причини провороту внутрішнього кільця підшипника з подальшим зломом шийки. Цей напіввагон було завантажено урановою рудою. Наслідки аварії вдалося ліквідувати лише до 19.20 години того ж дня. Не торкаючись можливих небезпечних екологічних наслідків, підраховано, що економічні втрати від цієї аварії склали декілька мільйонів гривень.

В ремонтному виробництві рухомого складу залізниць на сьогоднішній день, як правило, застосовують дві технології відновлення натягу пресового з’єднання: нанесення еластомеру ГЕН-150(В) та електролітичне осадження на постійному струмі цинкового покриття на внутрішню по-

верхню кілець підшипників. Вищезазначені технології відновлення мають ряд значних недоліків, зокрема: застосування еластомеру потребує спеціального обладнання для відцентрового чи вібраційного нанесення; під час звичайного нанесення за допомогою кисточки шар полімеру на поверхні спряження нерівномірний, тому після його застигання натяг нерухомого з'єднання буксового вузла в кожній точці спряження також нерівномірний; нарешті, експлуатаційні можливості еластомеру змінюються в залежності від робочої температури буксового вузла. Цинк, осаджений на постійному струмі, має крупнозернисту, крихку структуру, яка під час обробки перед посадкою кілець на шийку осі колісної пари, а також в процесі експлуатації швидко руйнується, призводячи до послаблення натягу нерухомого з'єднання. Всі ці недоліки є одними з найчастіших причин заходів відремонтованої рухомої одиниці на позаплановий ремонт.

У зв'язку з вищевикладеним оцінка існуючого рівня надійності експлуатації з'єднання „шийка осі колісної пари – внутрішнє кільце підшипника кочення” та розробка нових, більш простих та економічно доцільних, ресурсозберігаючих технологій відновлення, які до того ж будуть задовольняти заданий рівень надійності, є актуальною задачею теоретичних та практичних робіт.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планом науково-дослідних робіт „Укрзалізниці” на 2003-2005 рр. (наказ Міністерства транспорту та зв'язку України №220 від 16.03.2004) за темою „Наукове обґрунтування та розробка нових технологій та установки гальванотехнічного відновлення натягу внутрішніх кілець підшипників колісних пар, тягових двигунів і допоміжних електричних машин рухомого складу”. шифр роботи 21.02.04.05, державний реєстраційний номер 0104U006657, а також за планом на 2002-2004 рр. дослідних робіт Придніпровської залізниці за темою „Розробка технології, виготовлення та впровадження установки гальванотехнічного відновлення натягу внутрішніх кілець підшипників кочення колісних пар, тягових двигунів і допоміжних електричних машин електровозів ВЛ8”, шифр роботи ПР/НТО(Т)-02-16/НЮ-2081/21.12.02.04., державний реєстраційний номер 0103U005110.

Мета роботи. Підвищення рівня експлуатаційної надійності роботи та здешевлення ремонту нерухомої системи „шийка колісної пари – внутрішнє кільце підшипника кочення” буксового вузла рухомого складу залізниць шляхом їх відновлення електролітичним цинкуванням імпульсно-реверсованим струмом.

Задачі дослідження

1. Встановити кількісні імовірно-статистичні закономірності зносу з'єднання з гарантованим натягом буксового вузла рухомого складу залізниць.
2. Розробити математичні моделі і методики визначення параметричної надійності нерухомого з'єднання з врахуванням похибок поверхонь спряження у поперечному та повздовжньому перерізах.
3. Вибрати, обґрунтувати та експериментальним шляхом визначити найбільш ефективні методи відновлення зношених деталей зазначеного спряження.
4. Виконати роботи по вибору відновлювального матеріалу, а також порівняти міцність з'єднання з гарантованим натягом, відновленого із застосуванням різних матеріалів та технологічних процесів відновлення.

5. Виконати порівняльні експлуатаційні випробування на зносостійкість поверхонь спряжень нерухомих з'єднань, відновлених різними методами.

6. Розробити і виготовити дослідно-промислово установа, впровадити і налагодити технологічний процес відновлення натягу нерухомого з'єднання буксового вузла методом електролітичного осадження цинку імпульсно-реверсованим струмом.

Об'єкт дослідження – процеси експлуатації та ремонту рухомого складу залізниць України.

Предмет дослідження – ремонт з'єднання з гарантованим натягом буксового вузла рухомого складу залізниць.

Методи дослідження. Для оцінки показників надійності нерухомого з'єднання і технологічних процесів відновлення застосовували методи теорії імовірностей, математичної статистики і надійності. Вимірювання поверхонь спряження здійснювали відомими експериментальними методами з застосуванням відомих інструментів. Структуру та морфологію відновлювальних шарів досліджували металофізичними методами на приладах: ПМТ-3; металографічному мікроскопі МІМ-7; рентгенівському дифрактометрі ДРОН-УМ-1; профілографі „Калібр-ВЕІ”. Механічні властивості пресових з'єднань досліджували на гідравлічних пресах: УГ20/2, МС-1000, ГМС-100. Електро-технічні виміри виконували осцилографічно на приладах С1-68 і С1-83 та з використанням електровимірювальних приладів з класом точності 0,5.

Обробку експериментальних даних виконували на ПЕОМ з використанням спеціалізованих програмних забезпечень: STATISTIKA, EXCEL, MAPLE та MATHCAD.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено нові математичні імовірнісні моделі та методики визначення параметричної надійності нерухомого пресового з'єднання „шийка осі колісної пари – внутрішнє кільце підшипника”, які відрізняються від існуючих моделей та методик врахуванням овальності, нециліндричності і хвильоподібної зміни форми деталей з'єднання, що дозволило більш точно оцінити показники експлуатаційної надійності роботи буксового вузла.

2. Вперше встановлено закономірності зношування і зміну форми поверхонь шийок колісних пар та внутрішніх кілець підшипників буксового вузла від пробігу електровозів і вагонів в умовах їх реальної експлуатації.

3. Отримано та проаналізовано нові залежності зносостійкості, міцності та надійності пресового з'єднання від впливу експлуатаційних факторів, виду металу, структури, товщини та фізико-механічних властивостей відновлювального шару.

4. Запропоновано механізм експлуатаційного зношування матеріалів деталей нерухомого з'єднання „шийка осі – внутрішнє кільце підшипника”(як корозійно-абразивний), що дозволило більш точно підібрати вид металу (цинк) і необхідні властивості його відновлювальних шарів.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблені моделі параметричної надійності нерухомого з'єднання буксового вузла, які можуть бути застосовані для прогнозування надійності буксових вузлів різних видів рухомого складу залізниць в процесі їх експлуатації.

2. Розроблена методика, визначення параметричної надійності нерухомого з'єднання з врахуванням похибок у поперечному та повздовжньому перерізах, дає можливість скласти моделі для будь-яких нерухомих з'єднань, що застосовуються на рухомому складі залізниць.

3. В локомотивному депо Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці впроваджено розроблені за результатами дисертаційних досліджень технологія та установка відновлення електролітичним цинкуванням імпульсно-реверсивним струмом внутрішніх кілець підшипників типу 3042536ЛМ та 3052536ЛМ електровозів ВЛ8.

4. В результаті експлуатаційних досліджень встановлено, що в процесі зносу поверхонь спряжень з кільцями, відновленими за запропонованою в дисертації технологією, імовірність того, що розміри шийки не вийдуть за межі встановлені нормативною документацією зросли від 0,305 до 0,966, а надійність цинкового покриття осадженого імпульсно-реверсивним струмом зросла до 0,136 у порівнянні (у порівнянні з покриттям осадженим на постійному струмі, для якого 0,051).

5. Розроблені технологія та установка прийняті для їх впровадження на ВАТ „Запорізький електровозоремонтний завод”.

6. За результатами досліджень Головному управлінню Укрзалізниці Міністерства транспорту України запропоновано впровадити у гальванічних відділеннях депо, які мають право виконувати повну ревізію буксового вузла, розроблену технологію відновлення натягу.

Особистий внесок здобувача полягає в плануванні та проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, обробці отриманого матеріалу, формулюванні наукових положень і висновків. Постановку мети і задачі дослідження виконано спільно з науковим керівником. Крім цього, в публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, автору належить: в [1, 2, 9] – розробка математичних моделей зносу нерухомих з'єднань буксових вузлів електровозів; [5] – розробка математичної моделі зносу деталей нерухомих з'єднань буксових вузлів електровозів з одночасним врахуванням похибок у поперечному та повздовжньому перерізах; [11, 12, 7] – вибір ефективних режимів електроосадження цинку та дослідження його механічних властивостей. В роботах, які були написані автором особисто, викладено: [4] – розробка моделі зносу деталей нерухомого з'єднання з урахуванням похибки у повздовжньому перерізі; [3, 13] – визначення параметричної надійності нерухомих з'єднань буксових вузлів вагонів з врахуванням похибки деталей у поперечному та повздовжньому перерізах, а також визначено необхідну кількість запасу деталей для проведення селективної зборки з'єднання; [10] – обґрунтування вибору електролітичного цинку у якості матеріалу відновлення кілець підшипників буксового вузла; [6] – результати досліджень міцності пресових з'єднань з відновленими деталями; [14] – результати моніторингу з питань якісного та кількісного зносу шийок осей колісних пар та внутрішніх кілець підшипників.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались і одержали схвалення на наступних міжнародних науково-технічних конференціях: IV-й „Состояние и перспективы развития электроподвижного состава”, Новочеркаськ, Росія, 2003 р.; 3-ої „Инженерия поверхности и реновация изделий”, Ялта, 2003 р.; 4-ої „Инженерия поверхности и реновация изделий”, Ялта, 2004 р.; „Наука в транспортному вимірі”, Київ, 2005 р.; 65-ій „Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”, Дніпропетровськ, 2005 р.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 13 наукових працях у тому числі: 7 – у фахових виданнях; 6 – в матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаної літератури і 4 додатків. Основний текст роботи викладено на 143 сторінках. Дисертація містить 91 рисунок і 8 таблиць; рисунки і таблиці, які розміщені на окремих сторінках, займають 22 сторінки. Список літератури з 101 найменувань на 9 сторінках. Додатки на 16 сторінках. Повний об'єм дисертації складає 207 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність досліджень, сформульовані мета і завдання досліджень, приведені основні наукові положення та результати, які винесені на захист, а також відомості про практичне значення результатів роботи, їх апробацію і публікацію матеріалів дослідження.

У *першому розділі* представлено конструктивно-технологічні характеристики нерухомого з'єднання „шийка осі колісної пари – внутрішнє кільце підшипника кочення” буксових вузлів електровозів та вагонів, розглянуто умови експлуатації даного з'єднання. Проведено аналіз літератури на предмет дослідження: впливу різноманітних експлуатаційних та технологічних факторів на міцність з'єднань з гарантованим натягом; методів відновлення нерухомих з'єднань взагалі та буксового вузла зокрема.

Згідно правил ремонту електровозів застосовують такі методи відновлення цього з'єднання: електролітичне залізнення та цинкування внутрішньої поверхні внутрішнього кільця підшипника, а також нанесення еластомеру ГЕН-150(В) на цю поверхню.

В розглянутій літературі електролітичне осадження металів на поверхні спряження нерухомого з'єднання розглядається як метод підвищення міцності, тому товщина осадженого шару становить не більше 50 мкм. При відновленні натягу пресового з'єднання товщина осадженого шару повинна досягати величини 500 мкм і при цьому повинно розв'язуватися дві задачі: по-перше, власне відновлення зношених деталей з'єднання, і по-друге, забезпечення його міцності. Вищезазначені технології відновлення мають певні переваги та недоліки, які визначають доцільність їх застосування.

Слід зауважити, що в деяких роботах міцність пресового з'єднання розглядається як показник надійності вузла. Автор даної роботи вважає помилковим додержуватися цієї думки, оскільки для заданого періоду роботи рухомої одиниці надійність визначається за деякою ознакою з певною імовірністю. Отже, показником надійності є імовірність безвідмовної роботи. Міцність пресового з'єднання – це ознака надійності, яка залежить від натягу спряження, який, у свою чергу, визначається дійсними розмірами посадочних поверхонь.

У *другому розділі* викладено умови електроосадження відновлювального шару, методи експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей осаджених шарів металів, а також міцності пресових з'єднань. Викладено методику визначення кількості необхідних спостережень, та виключення грубих помилок.

У *третьому розділі* викладено розроблені модель і методику та результати оцінки параметричної надійності міцності пресових з'єднань з врахуванням похибки розмірів деталей спряження у поперечному, повздовжньому, а також одночасно у поперечному та повздовжньому перерізах.

Параметрична надійність пресового з'єднання буксового вузла з врахуванням овальності. В результаті технологічних та експлуатаційних факторів, що діють на рухомий склад, виникають відхилення від правильної геометричної форми деталей пресового з'єднання буксового вузла. Ці відхилення викликають нерівномірність натягу, що, в свою чергу, призводить до сильного та нерівномірного зносу деталей, спотворення характеру посадки, і, як результат, обумовлюють аварійну роботу буксового вузла.

Для аналітичного вираження поточного розміру введемо полярну систему координат, полюс якої співпадає з центром профілю поперечного перерізу деталі. Шийка осі колісної пари з радіусом $R_{ш}$ та отвір внутрішнього кільця її підшипника з радіусом r_k зношуються до деякого випадкового значення, яке можна зобразити у полярній формі у вигляді рис. 1. Тоді полярний радіус ξ_k поперечного перерізу циліндричної деталі, що має елементарний вид похибки форми, аналітично можна записати як:

$$\xi_k(\varphi) = r_{cp} + x \cdot \cos\left(k \cdot \varphi + \psi_k^{(s)}\right), \quad (k=2, 3, \dots, p), \quad (1)$$

де r_{cp} – радіус середнього кола даної деталі, що визначається як середнє значення функції $\xi_k(\varphi)$;

x_k – амплітуда відхилення похибки форми від середнього радіуса перерізу циліндричної деталі;

$\psi_k^{(s)}$ – початкова фаза s -ої гармоніки відхилення форми кільця у поперечному перерізі;

s – номер гармоніки;

φ – кут обертання полярного радіуса.

Перший доданок правої частини виразу (1) являє собою випадкову величину, що виражає похибку розміру (радіуса деталі), а другий – елементарну випадкову функцію, що визначає похибку форми у поперечному перерізі. При $k=2$ другий доданок правої частини визначає овальність деталі, при $k=3$ – трьохгранний профіль, а при $k=p$ – огранку з p -вершинним профілем.

Випадковий характер полярного радіуса обумовлений тим, що під час експлуатації та в результаті різних технологічних процесів на вузол діють три незалежні між собою групи факторів: перша група викликає розсіювання похибки розміру r_{cp} ; друга – розсіювання початкової фази ψ_k овальності; третя – розсіювання величини амплітуди x похибки форми. Адитивна комбінація відхилення розміру r_{cp} та форми дає загальну похибку поточного розміру у поперечному перерізі циліндричної деталі. Таким чином, полярний радіус є функцією вищенаведених випадкових величин.

Для кожної окремої i -ої деталі похибка поточного розміру, являє собою деяку детерміновану функцію. Для партії деталей маємо сукупність певних реалізацій $\xi_k^{(i)}(\varphi)$ ($i=1,2,\dots,N$) полярних радіусів, кожна з яких у тій чи іншій мірі відрізняється від інших.

Безвідмовність „ i ”-ої деталі чисельно визначається імовірністю P виконання вимог нормативно-технічної документації по цьому параметру для кожної деталі, тобто це імовірність того, що

значення контрольованого параметра ξ_k під час огляду вузла знаходиться в межах поля допуску $(\alpha; \beta)$:

$$P(\alpha \leq \xi_k(\varphi) \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f_{\xi_k}(\xi_k) d\xi_k, \quad (2)$$

де $f_{\xi_k}(\xi_k)$ – закон розподілення досліджуваного параметра.

Для визначення надійності безвідмовної роботи нерухомого з'єднання, яка визначається натягом необхідно визначити закони розподілення розмірів поверхонь спряжень деталей. Закон розподілення радіуса внутрішнього кільця підшипників 3052536ЛМ, 3042536ЛМ, NU2236Е.М.1.С3, NJ2236 Е.М.1.С3 буксового вузла електровозів серії ВЛ8, ВЛ80, ВЛ82, ВЛ10, ВЛ11, ЧС4, ЧС7, ЧС8 є гаусовим з математичним сподіванням $m_{r_k} = 89,997$ мм і середньоквадратичним відхиленням $\sigma_{r_k} = 0,01034$ мм. Графічну модель формування похибки форми циліндричної деталі у поперечному перерізі зображено на рис 2 а), б).

Статистичні дослідження зносу шийки осі колісної пари дозволили встановити, що закон розподілення поточного розміру радіуса шийки $R_{ш}$ колісної пари з похибкою у поперечному перерізі описується законом (рис. 3):

$$f(R_{ш}) = \frac{\lambda^m}{\Gamma(m)} \cdot (R_{er} - R_{ш})^{m-1} \cdot e^{-\lambda \cdot (R_{er} - R_{ш})}, \quad (3)$$

де $\lambda=49,7797$; і $m=2$ – параметри розподілення;

$\Gamma(m)$ – гама-функція;

$R_{er}=90,015$ мм – розмір еталонного радіуса (параметр зміщення).

За розробленою методикою було отримано закон розподілення натягу нерухомого з'єднання „шийка осі – внутрішнє кільце”, яка описується формулою (рис. 4):

$$f(\delta) = \frac{\lambda^m}{\Gamma(m) \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot e^{-\lambda \cdot \left(R_{er} - 0,5 \cdot \lambda \cdot \sigma_{r_k}^2 - m_{r_k} + \delta/2 \right)} \times \right. \\ \left. \times \left(-R_{er} + \lambda \cdot \sigma_{r_k}^2 + m_{r_k} - \delta/2 \right) \cdot \left[erf \left(\frac{-R_{er} + \lambda \cdot \sigma_{r_k}^2 + m_{r_k} - \delta/2}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{r_k}} \right) - erf \left(\frac{\lambda \cdot \sigma_{r_k}^2 + m_{r_k} - \delta/2}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{r_k}} \right) \right] + \right. \\ \left. + \sigma_{r_k} \cdot exp \left[-\frac{\left(\delta/2 - m_{r_k} \right)^2}{2 \cdot \sigma_{r_k}^2} \right] \cdot exp \left[-\frac{R_{er} \cdot \left(0,5 \cdot R_{er} - m_{r_k} + \delta/2 \right)}{\sigma_{r_k}^2} \right] \right]. \quad (4)$$

За нормативними документами натяг нерухомого з'єднання буксового вузла повинен бути у межах $[0,035...0,065]$ мм. Підраховано, що імовірність безвідмовної роботи даного спряження склала $P(0,035 < \delta < 0,065) = 0,184$ (рис. 4). Це значення показує, що при повному огляді на ПРЗ лише 18,4% буксових вузлів будуть мати натяг, що задовольняє нормативні вимоги. Виконаємо

також аналіз імовірності безвідмовної роботи кілець підшипника і шийок колісних пар, а також усього буксового вузла вагонів. В результаті статистичних досліджень було встановлено, що закони розподілення радіуса кільця підшипників та шийки осі колісної пари є гаусовим з математичним сподівання відповідно $m_{r_k} = 64,997 \text{ мм}$, $m_{R_{ш}} = 65,02 \text{ мм}$ і середньоквадратичним відхиленням $\sigma_{r_k} = 3,836 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$, $\sigma_{R_{ш}} = 0,0226 \text{ мм}$. Далі, використовуючи вирази вищезазначених законів розподілення, отримуємо густину імовірності натягу системи “шийка осі – внутрішнє кільце”, яка описується формулою:

$$f(\delta_{ov}) = \frac{1}{2 \cdot \sigma_{0,5}^{ov} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{\left(\delta_{ov}/2 - m_{0,5}^{ov} \right)^2}{2 \cdot \left(\sigma_{0,5}^{ov} \right)^2} \right], \quad (5)$$

де математичне сподівання натягу нерухомого з'єднання $m_{0,5}^{ov} = 0,0232 \text{ мм}$, а середньоквадратичне відхилення $\sigma_{0,5}^{ov} = 0,02296 \text{ мм}$, крива розподілення (5) зображена на рис. 5.

Імовірність того, що натяг нерухомого з'єднання буксового вузла вагону залишиться у межах поля допуску, дорівнює $P(0,03 < \delta_{ov} < 0,065) = 0,297$.

Параметрична надійність пресового з'єднання буксового вузла з врахуванням конусності. В нормативній документації на рухомий склад залізничного транспорту встановлено норми допусків як на овальність так і конусність. Таким чином, було розроблено імовірнісні методи аналізу сумарних похибок циліндричної деталі у повздовжньому перерізі. В найбільш простих випадках розглядають такі елементарні похибки: конусність твірної циліндричної деталі у повздовжньому перерізі та овальність чи огранка у поперечному перерізі; гвинтоподібна твірна у повздовжньому і некруглість у поперечному перерізах; вигнута деталь з овальністю чи огранкою у поперечному перерізах; деталі з гвинтоподібною центральною лінією та такими ж похибками у поперечному перерізі.

Розглянемо випадок конусоподібної деталі, який широко розповсюджений на рухомому складі. Рівняння похибки циліндричної деталі з врахуванням конусності та колом у поперечному перерізі (рис. 6) можна записати так:

$$\xi_k(z) = r_{cp} + \alpha \cdot \left(z - \frac{L}{2} \right), \quad (6)$$

Для визначення закону розподілення похибки о циліндричної деталі зафіксуємо значення аргументу z . Оскільки розрахунки величини о циліндричної деталі з врахуванням конусності ведуться відносно середнього радіуса r_{cp} , а його значення розташовано в координаті $\frac{L}{2}$, то значення аргументу візьмемо рівним $z = \frac{L}{2}$. Тоді, формула похибки циліндричної деталі отримає наступний вигляд:

$$\xi_k\left(\frac{L}{2}\right) = r_{cp} + \alpha\left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2}\right) = r_{cp}. \quad (7)$$

Даний вираз показує, що при дослідженнях похибки циліндричних деталей з врахуванням їх конусності, можна обмежитися імовірністними розрахунками лише середнього радіуса r_{cp} .

Обробка та аналіз статистичних даних величин зносу кілець підшипників *буксового вузла електровозів*, показали, що середній радіус $r_{к.ср}$ посадкової поверхні внутрішнього кільця підшипника розподіляється за законом рис. 7:

$$f(r_{к.ср}) = \frac{D(r_{к.ср})}{\sigma_r \sqrt{42\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(r_{к.ср} - m_r)^2}{2 \cdot \sigma_r^2}\right], \quad (8)$$

де m_r – математичне сподівання середнього радіуса;

σ_r^2 – дисперсія розподілення середнього радіуса;

$D(r_{к.ср})$ – дисперсійна функція, яка має вигляд:

$$D(r_{к.ср}) = 1 - Ex - As\left(\frac{r_{к.ср} - m_r}{\sigma_r}\right) - 2Ex\left(\frac{r_{к.ср} - m_r}{\sigma_r}\right)^2 + \left(\frac{As}{3}\right)\left(\frac{r_{к.ср} - m_r}{\sigma_r}\right)^3 + \left(\frac{Ex}{3}\right)\left(\frac{r_{к.ср} - m_r}{\sigma_r}\right)^4, \quad (9)$$

де Ex і As – відповідно ексцес і асиметрія розподілення величини $r_{к.ср}$.

Закон розподілення коефіцієнта конусності α є логарифмічно-нормальним з параметрами $m_{ln\alpha} = -9,023$ та $\sigma_{ln\alpha}^2 = 0,203$.

В результаті статистичної обробки даних встановлено, що радіус середнього циліндра шийки осі колісної пари $r_{ш.ср}$ розподілений за імовірнісним законом, який описується виразом (3) з параметром розподілення $\lambda = 49,381$. Закон розподілення коефіцієнта конусності α є логарифмічно-нормальним з параметрами $m_{lg\alpha} = -4,424$ та $\sigma_{lg\alpha}^2 = 0,1733$.

Використовуючи вищенаведені результати досліджень, визначено, що закон розподілення величини натягу нерухомого з'єднання $\delta_{кон}$ з врахуванням конусності кільця підшипника та шийки осі колісної пари електровозу описується наступним чином:

$$f(\delta_{кон}) = \frac{\lambda^m}{\Gamma(m)4,583} \left[e^{-\lambda \cdot \left(R_{eT} - 0,5\lambda\sigma_{r_k}^2 + \delta_{кон}/2 - m_{r_k} \right)} \left(-R_{eT} + \lambda\sigma_{r_k}^2 - \delta_{кон}/2 + m_{r_k} \right) \left(Ex - \frac{1}{2} \right) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{-R_{eT} + \lambda\sigma_{r_k}^2 - \delta_{кон}/2 + m_{r_k}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{r_k}} \right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\lambda\sigma_{r_k}^2 - \delta_{кон}/2 + m_{r_k}}{\sqrt{2} \cdot \sigma_{r_k}} \right) \right] + \frac{1}{\sigma_{r_k} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\delta_{кон}/2 - m_{r_k})^2}{2 \cdot \sigma_{r_k}^2}\right] \cdot \frac{7}{3} Ex \cdot \sigma_{r_k}^2 \exp\left[-\frac{R_{eT} \cdot \left(0,5 \cdot R_{eT} + \delta_{кон}/2 - m_{r_k} \right)}{\sigma_{r_k}^2}\right] \right]. \quad (10)$$

Підставивши чисельні значення у (10) і далі у вираз (2) та проінтегрувавши його, отримуємо, що імовірність збереження натягу $P(0,035 < \delta_{\text{кон}} < 0,065) = 0,12$ (рис. 8).

Це значення імовірності свідчить, що при формуванні буксового вузла загальна кількість придатних кілець підшипників і осей колісних пар можуть сформувати лише 12% буксових вузлів, які будуть задовольняти вимоги міцності з'єднання з гарантованим натягом.

Згідно з отриманими у даній роботі статистичними даними, радіус середнього циліндра $r_{\text{к.ср}}$ внутрішньої поверхні внутрішнього кільця підшипника буксового вузла вагонів розподілено за нормальним законом з параметрами $m_{r_{\text{к.ср}}} = 64,997 \text{ мм}$, $\sigma_{r_{\text{к.ср}}} = 3,175 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$. Коефіцієнт конусності $\alpha_{\text{к}}$ теж має гаусове розподілення з параметрами $m_{\alpha_{\text{к}}} = 5,05 \cdot 10^{-5}$, $\sigma_{\alpha_{\text{к}}} = 2,19 \cdot 10^{-5}$.

Статистичні дослідження шийки осі колісної пари показали, що радіус середнього циліндра $r_{\text{ш.ср}}$ розподіляється за нормальним законом з параметрами $m_{r_{\text{ш.ср}}} = 65,0199 \text{ мм}$, $\sigma_{r_{\text{ш.ср}}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$. Коефіцієнт конусності шийки осі розподіляється за логарифмічно-нормальним законом, у якого математичне сподівання $m_{\ln \alpha} = -9,821$, а дисперсія $\sigma_{\ln \alpha}^2 = 0,309$.

Користуючись методикою, яка викладена в дисертаційній роботі, визначено закон розподілення величини натягу $\delta_{\text{кон}}$ з врахуванням конусності кільця підшипника та шийки осі колісної пари (рис.9):

$$f(\delta_{\text{кон}}) = \frac{1}{2 \cdot \sigma_{0,5}^{\text{кон}} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{\left(\delta_{\text{кон}} / 2 - m_{0,5}^{\text{кон}} \right)^2}{2 \cdot \left(\sigma_{0,5}^{\text{кон}} \right)^2} \right], \quad (11)$$

де математичне сподівання натягу нерухомого з'єднання $m_{0,5}^{\text{кон}} = 0,0231 \text{ мм}$, а середньоквадратичне відхилення $\sigma_{0,5}^{\text{кон}} = 4,368 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$.

Імовірність того, що натяг нерухомого з'єднання залишиться в заданих межах поля допуску $[0,03 \dots 0,065] \text{ мм}$, визначимо за (2) $P(0,03 < \delta_{\text{кон}} < 0,065) = 0,952$.

Імовірність входження величини натягу нерухомого з'єднання буксового вузла у межі допуску $[0,03 \dots 0,065] \text{ мм}$ при врахуванні тільки овальності складає 0,297, що значно менше від імовірності входження натягу у межі допуску при врахуванні тільки конусності, яка дорівнює 0,952. Тобто, вплив овальності на надійність з'єднання з натягом більш значний, ніж конусності.

Параметрична надійність нерухомого з'єднання деталей буксового вузла з одночасним врахуванням похибок у поперечному та повздовжньому перерізах. Результати статистичних досліджень, які були проведені в локомотивних депо та на електровозоремонтних заводах, показали, що внаслідок впливу експлуатаційних факторів макропрофіль шийки осі колісної пари електровозу набуває форми, розміри якої у поточній точці М (рис. 10) поперечного та повздовжнього перерізах приймають довільне значення. Аналітично таку форму можна записати виразом:

$$\xi_k(\varphi, z) = r_{k.cp} + x_k \cdot \cos(k\varphi + \psi_k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{L}z + m^{(n)}\right), \quad (12)$$

де $m^{(n)}$ – початкова фаза n -ої гармоніки повздовжнього перерізу шийки осі;

L – довжина циліндричної деталі;

k, n – кількість гармонік відповідно у поперечному і повздовжньому перерізах;

z – координата переміщення полярного радіуса у повздовжньому перерізі.

Перший доданок – складова правої частини виразу (12) є випадковою величиною, що описує похибку радіуса середнього циліндра і визначається як середнє значення функції (12), тобто ця величина визначає відхилення розміру. Другий доданок подає відхилення поточного розміру по куту повороту і осі деталі, отже, визначає похибку форми в поперечному і повздовжньому перерізах.

Для спрощення виразу (12) використаємо формулу добутку двох тригонометричних функцій. Враховуючи, що функція розподілення косинуса підпорядкована закону арксинуса, отримаємо закон розподілення функції похибки $\xi_k(\varphi, z)$. Згідно з центральною граничною теоремою, цей закон розподілення є гаусовим:

$$f(\xi_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi} \exp\left[-\frac{(\xi_k - m_\xi)^2}{2\sigma_\xi^2}\right], \quad (13)$$

де m_ξ, σ_ξ – математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення поточного розміру ξ .

При проведенні експериментальних досліджень виміри шийки осі колісної пари проводили у трьох перерізах: під внутрішніми кільцями зовнішнього та внутрішнього підшипника, а також під дистанційним кільцем. Для визначення параметричної надійності натягу необхідно було враховувати овальність кілець. Отримали вираз густини імовірності натягу δ нерухомого з'єднання “шийка осі колісної пари – внутрішнє кільце підшипника” (рис. 11):

$$f(\delta) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_\delta} \exp\left[-\frac{(\delta/2 - m_\delta)^2}{2\sigma_\delta^2}\right], \quad (14)$$

де $m_\delta = -0,021$ мм – математичне сподівання величини натягу системи;

$\sigma_\delta = 0,0335$ мм – середньоквадратичне відхилення натягу системи.

Таким чином, імовірність P того, що натяг залишиться у заданих межах, склала $P(0,035 < \delta < 0,065) = 0,07$.

Встановлено, що при селективному збиранні лише запас з 5 кілець буксового вузла електровозів та 32 – вагонів забезпечує формування вузла без простою колісної пари ПРЗ.

У **четвертому розділі** проведено вибір матеріалу відновлення, приведені результати досліджень фізико-механічних властивостей відновлювальних шарів цинку, осаджених в імпульсно-реверсивному режимах у порівнянні з цинком, осадженим на постійному струмі, а також порівняно міцності пресових з'єднань, які були відновлені електролітичним цинкуванням у стаціонарному

та нестационарному режимом. Проведено експерименти по визначенню міцності нерухомого з'єднання натурних зразків.

В процесі експлуатації рухомого складу залізниць нерухоме з'єднання буксового вузла підшипника зношується. Основними видами зношування є корозійно-абразивний знос від дії продуктів фретинг-корозії, що на 95% складаються з твердих абразивних частинок оксидів заліза.

Величина зносу є випадковою і досягає значення 300 мкм для шийки осі колісної пари і 250 мкм – для кілець підшипників. Законами розподілення величин зносу шийок осей колісних пар та внутрішніх кілець підшипників буксового вузла електровозів серії ВЛ, ЧС та вагонів є: логорифмічно-нормальним, гамма-розподілення та нормальний.

Візуальні спостереження за даним спряженням буксових вузлів електровозів та вагонів дозволяють стверджувати наявність слідів фретинг-корозії в окремих місцях спряження. Характер пошкоджень вказує на те, що причиною їх виникнення є відхилення від правильної геометричної форми спряжених поверхонь (конусність, овальність, огранка, корсетність тощо).

У якості відновлювального гальванічного покриття з ряду твердих та м'яких металів обрано цинкове, що обумовлено оцінкою результатів експериментально отриманих діаграм розпресування. При відносно невеликих питомих тисках електролітичний цинк проникає в самі незначні поглиблення мікропрофілю поверхні шийки осі. Тонка плівка цинку у місці спряження кільця з шийкою колісної пари різко підвищує площу фактичного контакту за рахунок низької границі текучості й тим самим підвищується міцність пресового з'єднання в 2...2,5 рази у порівнянні з пресовим з'єднанням без гальванічного покриття.

Для цинкових покриттів, осаджених імпульсно-реверсивним струмом рис. 12 з параметрами $J_{пр.сп} = 3,5...4 \frac{A}{dm^2}$, $J_{зв.сп} = \frac{J_{пр.сп}}{5}$, $\tau = \frac{t_{пр}}{t_{зв}} = \frac{30}{1}; \frac{20}{1}; \frac{6}{1}$, характерне збільшення густини дислокацій до $\rho = 4,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (у порівнянні з постійним струмом, для якого $\rho = 0,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$), зменшення блоків мозаїки $D = 40...50 \text{ нм}$ проти 500 нм на постійному струмі і дрібнозерниста структура – розміри зерен складають $L = 0,7...0,8 \text{ мкм}$ проти 15...16 мкм для стаціонарного електролізу. Наслідком цього є велика мікротвердість цинкового шару: $H_{\mu} = 1550...1600 \text{ МПА}$ проти $H_{\mu} = 700...750 \text{ МПА}$ на постійному струмі. Закон розподілення мікротвердості цинкового покриття є нормальним з математичним сподіванням $m_H = 1575 \text{ МПА}$ і середньоквадратичним відхиленням $\sigma_H = 8,3 \text{ МПА}$. Коефіцієнт відбиття поверхні осадженого цинку також досить великий, $K_g = 80...85 \%$ проти $K_g = 8...10 \%$ на постійному струмі.

За даними експериментальних досліджень було отримано розпресовочні характеристики з'єднань з деталями з покриттям цинку осаджених різними методами рис. 13

За результатами досліджень впливу шорсткості поверхонь спряжень було встановлено, що найбільш ефективними технологічними процесами обробки металів є ті, які забезпечують клас шорсткості поверхонь спряження $\nabla 7... \nabla 8$ рис. 14. Збільшення або зменшення шорсткості зменшує міцність пресових з'єднань.

В результаті досліджень впливу товщини відновлювального шару на міцність пресового

з'єднання встановлено, що сила розпресовки зразків з цинком, осадженим у нестационарних режимах, в заданих межах товщини завжди більша від сили розпресовки з'єднання без покриття. При товщині відновлювального шару близько 200 мкм відносна міцність $\frac{P_z}{P_M} \approx 1,5$ (рис. 15), на цьому рисунку: P_z, P_M – сили розпресовки відповідно з цинковим гальванічним покриттям і без нього. При тій же товщині цинку, осадженого постійним струмом, відносна міцність пресового з'єднання складає $\approx 0,89$.

Таким чином, дослідями було встановлено, що найбільш ефективним методом відновлення натягу пресових з'єднань є електролітичне осадження цинку імпульсно-реверсивним струмом.

Дослідження міцності пресових з'єднань „шийка – кільце” проводили на шийках колісних пар електровозів серії ВЛ та ЧС і на шийках колісних пар вагонів типу РУІ. Розпресовку натурних зразків виконували на гідравлічних пресах. Відновлювальний шар цинку осаджували на постійному та імпульсно-реверсивному струмах товщиною 150 мкм. Величина натягу пресового з'єднання складала 50 мкм.

Гальванічне покриття, що осаджене імпульсно-реверсивним струмом, підвищує міцність пресового з'єднання буксового вузла електровозів в 1,2...1,45 рази, а вагонів – у 1,6 рази. В той же час гальванічне покриття, яке осаджено постійним струмом, зменшує міцність. Відносна міцність нерухомого з'єднання буксових вузлів становить: для електровозів $\frac{P_z}{P_M} = 0,86...0,98$, а вагонів $\frac{P_z}{P_M} \approx 0,94$. Отже, міцність пресового з'єднання з цинковим гальванічним покриттям, осадженим у нестационарних режимах, в 1,5...1,8 рази більше міцності з'єднання з цинком, осадженим на постійному струмі. Огляд поверхонь спряжень шийок осей після розпресовки не виявив значних пошкоджень, спостерігалися лише незначні подряпини.

У *н'ятому розділі* подано результати промислової реалізації наукових розробок. На основі результатів виконаних вище досліджень було розроблено промислову установку відновлення кільця підшипників буксового вузла електровозів та вагонів. Крім того, було розроблене тиристорне джерело живлення ванни цинкування, що дозволяє одержувати імпульсно-реверсивний струм з регульованими параметрами для електролітичного осадження цинкових покриттів необхідної структури, а також виконувати процес електрохімічного полірування.

Було проведено оцінку показників надійності відновлених пресових з'єднань. Кільця, що були відновлені в гальванічному відділенні локомотивного депо Нижньодніпровськ-Вузол, встановлювали на електровози ВЛ-8, які експлуатуються на Придніпровській залізниці. Кільця, які відновлювали на ВАТ „ЗЕРЗ”, були встановлені на електровози типу ВЛ-80, що експлуатуються на Південно-Західній залізниці (депо приписки – Козятин).

Спостереження в процесі експлуатації за деталями нерухомого з'єднання з натягом, відновленим шляхом електролітичного цинкування внутрішньої поверхні внутрішнього кільця підшипника, під час проведення ПРЗ показали, що знос поверхні шийки осі колісної пари зменшився до середнього значення $\zeta_{ш. імп} = 0,016$ мм, у порівнянні з шийками осей з посадженими новими кі-

льцями $\zeta_{ш} = 0,0431$ мм та кільцями, відновленими цинкуванням на постійному струмі $\zeta_{ш.п} = 0,0216$ мм (рис 16).

Застосування імпульсно-реверсивного струму дозволило зменшити знос поверхонь відновлених кілець до середнього значення $\zeta_{к.імп} = 0,066$ мм, при проведенні ПРЗ, у порівнянні з відновленими на постійному струмі $\zeta_{к.п} = 0,106$ мм (рис 17).

Аналізуючи графіки зносу бачимо, що вони мають нелінійний характер, що особливо проявляється в початковий період, тобто в період приробки поверхонь. За експериментальними даними (рис. 16-17) було отримано апроксимуючі вирази середнього значення та середньоквадратичного відхилення зносу шийки осі колісної пари:

$$\left. \begin{aligned} \text{крива 1: } m_{ш}(L) &= 8,631 \cdot 10^{-4} + 0,05 \lg L, \\ \text{крива 2: } m_{ш}(L) &= 6,636 \cdot 10^{-4} + 0,025 \lg L, \\ \text{крива 3: } m_{ш}(L) &= 5,722 \cdot 10^{-4} + 0,018 \lg L, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

та, відповідно, внутрішньої поверхні кільця підшипника:

$$\left. \begin{aligned} \text{крива 1: } m_{к}(L) &= 2 \cdot 10^{-3} + 0,117 \lg L, \\ \text{крива 2: } m_{к}(L) &= 9,763 \cdot 10^{-4} + 0,083 \lg L. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Застосування імпульсно-реверсивних режимів цинкування для відновлення натягу нерухомого з'єднання буксового вузла дозволило підвищити імовірність безвідмовної роботи шийки осі колісної пари до значення 0,966. При цьому надійність відновлених кілець підвищилась на 8,5% у порівнянні з кільцями, відновленими цинкуванням на постійному струмі. Цинк на поверхні спряження в процесі роботи буксового вузла повністю виключив розвиток фретинг-корозії.

В дисертації виконано розрахунок річного економічного ефекту від підвищення надійності роботи нерухомого з'єднання, а також від власне впровадженної нової технології у порівнянні з існуючими. Підвищення надійності нерухомого з'єднання „шийка осі колісної пари – внутрішнє кільце підшипника” в процесі експлуатації дозволяє зменшити витрати на ремонт осей колісних пар електровозів серії ВЛ8, ВЛ80, ВЛ82, ВЛ10, ВЛ11 при проведенні ПРЗ в умовах ВАТ „ЗЕРЗ” в середньому на 450...650 тис. грн. Загальнорічний економічний ефект від впровадження нової технології електролітичного цинкування кілець підшипників склало: для кілець підшипників 3052536ЛМ, 3052536ЛМ, NU2236Е.М.1.С3, NJ2236Е.М.1.С3 98,92 тис. грн. в умовах ВАТ „ЗЕРЗ”, для кілець підшипників 232726Л1М, 42726ЛМ 36,6 тис. грн. в умовах ВАТ „КЕВРЗ”.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі виконаних теоретичних та експериментальних досліджень вирішена науково-технічна задача підвищення рівня експлуатаційної надійності, продовження терміну експлуатації та зменшення витрат на ремонт діючого рухомого складу залізниць. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертації полягають у наступному.

1. За результатами моніторингу, проведеного з метою встановлення найбільш небезпечних пошкоджень рухомого складу залізниць, встановлено, що зменшення натягу нерухомого з'єднання

„шийка осі колісної пари – внутрішнє кільце підшипника” буксового вузла рухомого складу залізниць складає 4...5 % від загальної кількості пошкоджень колісних пар, які, у свою чергу, складають 21...23 % заходів рухомого складу на позаплановий ремонт. На сьогодні існуюча технологія відновлення натягу шляхом безванного електролітичного осадження цинку на постійному струмі не забезпечує необхідної міцності пресового з’єднання. У той же час, кільця підшипників з ремонтними розмірами не випускаються, а нові поступають у комплектації підшипника вартістю від 283 грн. до 1385 (на лютий 2004 р.) в залежності від типу підшипника.

2. Експериментальними дослідженнями встановлено, що основною причиною пошкоджень нерухомого з’єднання є корозійно-абразивний знос поверхонь спряження деталей з’єднання. Величина зносу є випадковою і досягає: шийки осі колісної пари – 0,3 мм, внутрішнього кільця підшипника – 0,25 мм.

3. Найбільший вплив на робочій стан досліджуваного з’єднання чинять овальності шийки колісної пари та отвору підшипника. Імовірність того, що радіуси поверхонь шийки осі та внутрішнього кільця підшипника існуючого рухомого складу задовольняють вимоги нормативної документації, дорівнює: 0,71 – для шийок осей колісних пар електровозів; 0,56 – його підшипників; і 0,351 та 0,2 а для вагонних буксових вузлів відповідно.

4. Розрахунки показника надійності за розробленою математичною моделлю процесу зносу натягу системи „шийка осі – кільце підшипника” з врахуванням овальності спряжених поверхонь показують, що 81,6 % буксових вузлів електровозів та 70,3 % буксових вузлів вагонів при повному освідченні у депо потребують заміни кілець підшипників, оскільки натяг нерухомого з’єднання не задовольняє вимоги допусків. В той же час, при селективному збиранні нерухомого з’єднання лише 56 % кілець 3042536ЛМ, 3052536ЛМ, NU2236Е.М.1.С3, NJ2236Е.М.1.С3, а також 20 % кілець типу 232726Л1М, 42726ЛМ можуть бути застосовані у подальшій експлуатації. При цьому необхідний запас кілець підшипників буксового вузла електровозів для формування одного з’єднання з виключенням простою колісних пар при проведенні ПРЗ дорівнює 5 шт, а вагонів 32 шт.

5. Встановлено, що під час проведення деповського ремонту ПРЗ електровозів, після пробігу колісної пари 330 тис. км, лише ~39% кілець підшипників та ~48% шийок осей задовольняють норми відхилення середнього радіуса. При цьому імовірність того, що натяг нерухомого з’єднання буде задовольняти норми допусків з зазначеної величини складає 0,12. Одночасно імовірність того, що відхилення середнього радіуса залишиться у заданих межах допуску для кілець підшипників вагонів 42726ЛМ, 232726Л1М складає лише 0,149. Відхилення середнього радіуса шийки осі незначне, ~97,9% колісних пар, які були оглянуті на деповському ремонті ПРЗ, задовольняють вимоги нормативної документації. Таким чином, відхилення середнього радіуса ~95,2% нерухомих з’єднань будуть задовольняти умови натягу.

6. Величина коефіцієнта конусності не має значного впливу на надійність системи з’єднання, оскільки з загальної кількості колісних пар, які надходять на проведення деповського ремонту ПРЗ після пробігу колісної пари 330 тис. км ~10% кілець підшипників типів 3042536ЛМ, 3052536ЛМ, NU2236Е.М.1.С3, NJ2236Е.М.1.С3 і шийок осей електровозів серії ЧС7, ЧС8, ВЛ8, ВЛ80 та ВЛ82 всіх модифікацій задовольняють вимоги нормативної документації, а ~15% кілець підшипників типу 42726ЛМ, 232726Л1М та ~7% шийок осей колісних пар вагонів не задовольняють норми допусків щодо коефіцієнта конусності.

7. Для відновлення зношеного шару металу та створення допустимого натягу нерухомого з'єднання з ряду твердих та м'яких металів обрано цинк, оскільки він має невисоку вартість і обумовлює найбільший коефіцієнт тертя ($f=0,53$ при $P_{oc}=37$ МПа). Запропоновано відновлювати натяг цинкуванням у нестационарних режимах на імпульсному реверсивному струмі. Осади, що отримані в нестационарних режимах, характеризуються високою мікротвердістю, великою однорідністю, а також мають дрібнозернисту та щільну структуру. Застосування нестационарних режимів підвищує клас шорсткості поверхні, округляє мікроступи, підвищує границю пружності та стійкість металу кільця підшипника проти корозії, а отже забезпечує більш надійну роботу з'єднання. Міцність пресових з'єднань з цинковим гальванічним покриттям, осадженим у нестационарних режимах, більша міцності з'єднань з цинком, осадженим на постійному струмі, в $\approx 1,4...1,7$ рази.

8. Дослідженнями міцності пресового з'єднання вперше було встановлено, що відносна міцність пресового з'єднання суттєво залежить від товщини осадженого цинку. Після досягнення свого максимального значення, рівного $\approx 2,5$ (при товщині цинку 35-40 мкм), відносна міцність пресового з'єднання починає поступово зменшуватися. Причому у пресових з'єднаннях з цинковим гальванічним покриттям, осадженим на постійному струмі, цей спад проявляється швидше, ніж при осадженому в нестационарних режимах і при значенні товщини осадженого шару більше 140 мкм міцність пресового з'єднання стає меншою, ніж міцність з'єднання без покриття. Сила розпресовки зразків з цинком, осадженим у нестационарних режимах, в заданих межах товщини завжди більша від сили розпресовки з'єднання без покриття. При товщині відновлювального шару близько 200 мкм відносна міцність складає 1,5.

9. Розроблено і змонтовано в гальванічному відділенні локомотивного депо Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці дослідно-промислову установку для відновлення кілець підшипників буксового вузла електровозів серії ВЛ електролітичним цинкуванням імпульсно-реверсивними струмами. Відпрацьовано ефективні режими технологічного процесу відновлення.

10. Застосування нестационарних режимів електроосадження відновлювального шару цинку, дозволило підвищити імовірність безвідмовної роботи шийок осей колісних пар даного типу електровозів до значення 0,966 (знос зменшився у 1,5...2,5), при цьому надійність відновлених кілець підвищилась на 8,5% (знос зменшився у 1,5...2) у порівнянні з кільцями осадження цинку, яких здійснювалось за існуючими технологіями, прийнятими у ремонтному виробництві залізниць. Цинк на внутрішній поверхні внутрішнього кільця підшипника в процесі роботи буксового вузла практично повністю виключив механічні та корозійні пошкодження поверхні шийки осі колісної пари.

11. Щорічний економічний ефект від впровадження розробленої технології і установки по відношенню до невідновлених спряжень та існуючих на сьогоднішній день технологій, за рахунок підвищення надійності нерухомого з'єднання буксових вузлів електровозів ВЛ8, ВЛ80, ВЛ82, ВЛ10, ВЛ11, відремонтованих в умовах ВАТ „ЗЕРЗ” відповідно склали 650 тис.грн. та 450 тис.грн.

Основні положення і результати дисертації опубліковані в таких роботах:

1. Михаліченко П.Є., Костін М.О Відновлення натягу пресового з'єднання буксових вузлів рухомого складу залізниць// Залізничний транспорт Україна. – 2004. - №5 – С. 47-49.

2. Михаліченко П.Є., Костін М.О. Параметрична надійність нерухомого з'єднання буксового вузла рухомого складу з врахуванням некруглості // Залізничний транспорт України. – 2004. - №6 – С. 47-50.
3. Михаліченко П.Є. Характер та величина зносу деталей пресового з'єднання буксового вузла вагонів// Вісник ДНУЗТ – 2005. – № 6 – С. 92-101.
4. Михаліченко П.Є. Параметрична надійність з'єднання з гарантованим натягом рухомого складу з врахуванням конусності// Залізничний транспорт України. – 2005. - № 2 – С. 71-74.
5. Костін М.О. Михаліченко П.Є. Математична модель форму зношених деталей системи спряження „шийка осі колісної пари – внутрішнє кільце підшипника”// Вісник ДНУЗТ – 2004. – Вип. 4– С. 149-155.
6. Михаліченко П.Є. Забезпечення міцності з'єднання з гарантованим натягом електромеханічних систем// Гірничі електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2005. – Вип.74. – С. 137-142.

Додаткові праці:

7. Мищенко Т.Н., Михаліченко П.Є., Костін Н.О. Вероятностные характеристики случайной функции напряжения на токоприемнике первого украинского электровоза ДЭ1// Електротехніка і Електромеханіка – 2003, – № 2 – С. 43-45.
8. Костін М.О., Михаліченко П.Є. Параметрична модель надійності циліндричних деталей, що зношуються з врахуванням їх овальності// Инженерия поверхности и реновация изделий. Материалы 3-й международной н.т. конференции, Киев, 2003. – С. 138-139.
9. Михаліченко П.Є. Методи восстановления натяга узла “шейка колесной пары – внутреннее кольцо подшипника”. // Материалы IV международной научно-технической конференции “Состояние и перспективы развития электроподвижного состава”. – Новочеркасск. - 2003. – С. 183-184.
10. Михаліченко П.Є., Артемчук В.В. Восстановление соединений с гарантированным натягом импульсными электролитическими режимами// Инженерия поверхности и реновация изделий. Материалы 4-й международной научно-технической конференции, – Киев, 2004. – С. 149-151.
11. Артемчук В.В., Костін М.О., Михаліченко П.Є. Нанесення баготношарових відновлювальних покриттів// Инженерия поверхности и реновация изделий. Материалы 4-й международной научно-технической конференции, – Киев, 2004. – С. 35-38.
12. Михаліченко П.Є. Вплив геометричної форми деталей на надійність пресового з'єднання буксового вузла рухомого складу залізниць.// Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту. Матеріали 65 міжнародної науково-практичної конференції, – Дніпропетровськ, 2005. – С. 54-55.
13. Михаліченко П.Є. Технічний стан пресового з'єднання буксового вузла рухомого складу залізниць.// Наука в транспортному вимірі. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, – Київ, 2005. – С. 197.

АНОТАЦІЯ

Михаліченко П.Є. Підвищення надійності буксових вузлів рухомого складу залізниць – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2006.

Дисертація присвячена підвищенню надійності роботи та здешевленню ремонту з'єднання з гарантованим натягом буксових вузлів рухомого складу залізниць, шляхом відновлення внутрішньої поверхні внутрішнього кільця підшипника кочення електролітичним осадженням цинку у нестационарних режимах.

Розроблено методику та модель оцінки параметричної надійності нерухомого з'єднання буксового вузла з врахуванням відхилення розмірів поверхонь спряжень його деталей у поперечному, повздовжньому та одночасно в обох цих перерізах. Дана методика вперше дозволила встановити закономірності зношування і зміну форми поверхонь шийок осей колісних пар та внутрішніх кілець підшипників буксового вузла від пробігу рухомого складу в реальних умовах експлуатації.

Запропоновано нові залежності зношування, міцності та надійності з'єднання з гарантованим натягом даного вузла від впливу фізико-механічних властивостей, структури, товщини відновлювального шару, а також технологічних та експлуатаційних факторів.

Розроблено і впроваджено технологію та установку відновлення натягу нерухомого з'єднання, розраховано річний економічний ефект від підвищення надійності роботи вузла, а також від власне технології у порівнянні з існуючими технологіями.

Ключові слова: надійність, натяг, овальність, конусність, нерухоме з'єднання, шийка колісної пари, кільце підшипника, знос, відновлення, нестационарний електроліз, цинкування, відновлювальний шар.

АННОТАЦІЯ

Михаличенко П.Е. Повышение надёжности буксовых узлов подвижного состава железных дорог. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2006.

Диссертация посвящена повышению надежности работы и снижению стоимости ремонта соединения с гарантированным натягом буксовых узлов колесных пар подвижного состава железных дорог путём восстановления внутренней поверхности внутреннего кольца подшипника качения электролитическим осаждением цинка в нестационарных режимах.

В работе приведены основные технические характеристики соединения с гарантированным натягом “шейка оси – внутреннее кольцо подшипника качения” буксовых узлов различных видов подвижного состава, проанализированы условия работы в процессе эксплуатации колесной пары и определены причины ослабления натяга, основной из которых является физико-механическая нестабильность размеров кольца подшипника.

Выполнено планирование экспериментальных исследований, которые необходимы для определения износа реальных деталей сопряжения, выбора материала и условий восстановления ко-

лец подшипников, для которых подобраны материалы, детали-образцы, инструменты, а также условия проведения опытов.

Для анализа эксплуатационной надежности буксовых узлов электровозов и вагонов разработаны математические модели и методики оценки параметрической надежности с учетом отклонения размеров поверхностей деталей сопряжения в поперечном, продольном и одновременно в обеих этих плоскостях для неподвижных соединений буксовых узлов электровозов серии ВЛ, ЧС и вагонов прошедших длительную эксплуатацию на железных дорогах Украины. Данная методика впервые позволила установить закономерности износа и изменения формы поверхностей шейки оси колесной пары и внутреннего кольца подшипника буксового узла от пробега подвижного состава в реальных условиях эксплуатации. На основании полученных результатов определен запас колец необходимый для проведения селективной сборки буксовых узлов без простоя колесных пар во время текущего ремонта ТРЗ.

По результатам экспериментов и визуальным наблюдениям за работой вышеуказанного соединения произведен анализ влияния изменения формы на механизм абразивно-коррозионного износа поверхностей сопряжения в условиях реальной эксплуатации буксовых узлов. Описаны процессы выбора материала восстановления, проведенного на масштабных образцах с различными гальваническими покрытиями, которые наиболее часто используются в ремонтном производстве железнодорожного транспорта. Определяющим параметром данного выбора было усилие распрессовки масштабных образцов, которое определялось на гидравлическом прессе по распрессовочным диаграммам. В качестве восстановительного материала был выбран электролитический цинк, который повышает прочность прессового соединения, защищает металл основания от коррозии, а также уменьшает износ поверхностей сопряжения. На основании распрессовочных характеристик, полученных на том же гидравлическом прессе, были подобраны наиболее эффективные параметры обработки поверхностей сопряжения после восстановления втулок, гальваническим осаждением цинка.

Для процесса восстановления колец в нестационарных режимах были проведены эксперименты с использованием различных форм токов, среди которых наиболее эффективным и менее трудоемким в реализации оказался импульсно-реверсивный ток. Подобраны наиболее эффективные параметры указанного тока, которые являются основополагающими для осаждения мелкокристаллического, плотного осадка цинкового покрытия.

Впервые были определены зависимости прочности прессового соединения с втулками, восстановленными на постоянном и импульсно-реверсивном токах, от толщины восстановительного цинкового покрытия в сравнении с прессовыми соединениями без покрытий.

Для подтверждения выбора цинкового гальванического покрытия, а также правильности подбора параметров технологического тока осаждения, в заключении были проведены эксперименты на натуральных образцах шеек осей колесных пар электровозов и вагонов с восстановленными внутренними кольцами подшипников. На основании всех выше описанных исследований были сделаны соответствующие выводы.

По результатам диссертационной работы разработаны и в гальваническом отделении локомотивного депо Нижнеднепровск-Узел Приднепровской железной дороги внедрены технология и установка восстановления внутренних колец подшипников качения буксового узла электровозов

ВЛ8. Указанные технология и установка приняты для использования ВАТ “ЗЭРЗ” г. Запорожье. Рассчитан годовой экономический эффект от повышения надежности работы буксового узла, а также от собственно разработанной технологии.

Ключевые слова: надёжность, натяг, овальность, конусность, неподвижное соединение, шейка колесной пары, кольцо подшипника, износ, восстановление, нестационарный электролиз, цинкование, восстановленный слой.

ABSTRACT

Mikhalichenko P.Y. The increase of the stationary joint reliability of the slipping junction of the railway rolling stock – Manuscript.

Thesis for a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.22.20 – Repair and exploitation of rolling stock. Dnipropetrovsk national university of railway transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk, 2005.

The thesis is dedicated to the increase of work reliability and to the lowering of costs of repair of joint with the guaranteed interference of the slipping junctions of the railway rolling stock by means of the reduction of insidesurface of bearing rings by electrolytic settling of ring in non-stationary mode.

The methods and model of the valuation of the parametrical reliability of the stationary joint of the slipping junction in view of the lower deviation of the mating members in rolling? pitching planes and in both ones at the same time have been developed. For the first time this technique allowed to establish the objective laws of wear and change in surface shape of axle neck of the wheelpair and of the inner race of the slipping junction with the rolling stock run in the real conditions of the exploitation.

New dependences of wear? strength and reliability of junction are provided with the guaranteed tension of the junction from the influence of physical and mechanical characteristics, structure, thickness of the reclaimed layer and from the technical and operation factors.

The technology and installation of tightness restoration of stationary joint has been developed and introduced. The annual economic effect from the increase of the reliability of junction work has been calculated and of the technology itself as compared with the existing technologies.

Keywords: reliability, interference, ovality, taper, stationary joint, wheelset neck, bearing ring, wear, restoration, non-stationary electrolysis, zinc plating, the rebuilt layer.

Михаліченко Павло Євгенович

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ БУКСОВИХ ВУЗЛІВ
РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ**

Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку ”__” _____ 2006 р.

Формат 60x84 1/16. Папір для множильних апаратів. Різограф.

Ум. др. арк 1,0. Обл.-вид. л. 1,0. Тираж 100 прим.

Замовлення № _____. Безкоштовно.

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

*Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:
49010, Дніпропетровськ, вул. Акад. Лазаряна, 2.*