

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ імені академіка В. ЛАЗАРЯНА

На правах рукопису

Артемчук Віктор Васильович

УДК 629.4.027:621.79

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ  
ШАРУВАТИМИ ПОКРИТТЯМИ ПРИ РЕМОНТІ  
РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Науковий консультант  
доктор технічних наук, професор  
Гетьман Геннадій Кузьмич

Дніпропетровськ – 2012

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ВСТУП   | 7  |
| РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ  | 19 |
| 1.1 Конструктивно-технологічні характеристики деталей механічної частини рухомого складу; вимоги до них | 19 |
| 1.1.1 Конструктивні елементи механічної частини, що використовують на залізничному рухомому складі      | 21 |
| 1.1.2 Електрорухомий склад (ЕРС)  | 24 |
| 1.1.3 Тепловози   | 25 |
| 1.1.4 Вагони  | 26 |
| 1.2 Пресові з'єднання усіх видів рухомого складу  | 27 |
| 1.3 Існуючі методи відновлення деталей суцільними одношаровими покриттями; їх недоліки                  | 28 |
| 1.4. Існуючі види багатошарових металевих композитів (покриттів) та методи їх отримання                 | 41 |
| 1.5. Висновки до розділу 1. Задачі досліджень   | 47 |
| РОЗДІЛ 2 УМОВИ, МЕТОДИКИ ТА ПРИЛАДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  | 49 |
| 2.1 Методи дослідження структури покриттів  | 49 |
| 2.2 Методи дослідження властивостей покриттів   | 51 |
| 2.3 Математичне моделювання планування експериментів  | 57 |
| РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ШАРУВАТИХ ПОКРИТТІВ                           | 70 |
| 3.1 Загальні положення формування відновлювальних шарів   | 70 |
| 3.2 Реологічні властивості шаруватих покриттів  | 71 |
| 3.3 Вплив структури шаруватих покриттів на деякі механічні властивості                                  | 89 |
| 3.4 Побудова математичної моделі зносу деталей рухомого складу з уточненими параметрами                 | 94 |

|   |            |
|---|------------|
|   | 3          |
| 3.5 Теоретичні основи моделювання зносу шаруватих покриттів   | 109        |
| 3.5.1 Моделювання контактної взаємодії поверхонь та зносу шаруватих покриттів   | 109        |
| 3.5.2 Визначення раціональних параметрів шаруватого покриття при відновленні зношених деталей   | 123        |
| 3.6 Основи оцінки якості відновлення деталей рухомого складу за декількома показниками  | 127        |
| 3.7 Висновки до розділу 3   | 127        |
| <b>РОЗДІЛ 4 ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ РУХОМОГО СКЛАДУ ШАРУВАТИМ НАПЛАВЛЕННЯМ</b>  | <b>130</b> |
| 4.1 Вибір деталей рухомого складу для наплавлення, характеристика та механізм їх зношування   | 130        |
| 4.1.1 Характеристика та механізм зношення елементів автозчепних пристроїв   | 130        |
| 4.1.2 Характеристика та механізм зношення вузла «п'ятник – підп'ятник»  | 142        |
| 4.1.3 Пошкодження та руйнування деталей внаслідок впливу циклічних механічних навантажень   | 146        |
| 4.2 Властивості сталей, що застосовують при виготовленні розглядуваних деталей  | 149        |
| 4.2.1 Зварюваність вуглецевих сталей, що застосовують при виготовленні розглядуваних деталей  | 150        |
| 4.3 Вибір матеріалів для наплавлення деталей рухомого складу  | 151        |
| 4.4 Структура і властивості металу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-Г13Х13Н2МФ   | 156        |
| 4.5 Дослідження впливу погонної енергії на структуру і тріщиностійкість ЗТВ при наплавленні порошковим дротом ПП-Нп-Г13Х13Н2МФ                        | 163        |
| 4.6 Обґрунтування вибору матеріалу для наплавлення підшару при шаруватому відновленні деталей рухомого складу залізниць методами дугового наплавлення | 165        |

|   |     |
|---|-----|
| 4.7 Оцінка якості та надійності технологічних процесів наплавлення деталей рухомого складу залізниць                | 168 |
| 4.8 Висновки до розділу 4   | 173 |
| <b>РОЗДІЛ 5 ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ РУХОМОГО СКЛАДУ</b>   |     |
| <b>ШАРУВАТИМИ ГАЗОТЕРМІЧНИМИ ПОКРИТТЯМИ</b>   |     |
| 5.1 Характеристика та механізм зношення деталей, виготовлених з базового матеріалу                                  | 177 |
| 5.2 Вплив умов газотермічного напилення на структуру та властивості шаруватого покриття                             | 181 |
| 5.2.1 Загальні умови нанесення відновлювальних газотермічних покриттів  | 181 |
| 5.2.2 Структура та властивості шаруватого газотермічного покриття   | 182 |
| 5.2.3 Структура та властивості аморфних відновлювальних покриттів на основі заліза                                  | 191 |
| 5.2.3.1 Підвищення міцності зчеплення покриття з основою деталі   | 194 |
| 5.3 Теоретичне визначення працездатності шаруватих газотермічних покриттів  | 199 |
| 5.4 Визначення раціональних параметрів шаруватого покриття при відновленні зношених деталей газотермічними методами | 208 |
| 5.5 Висновки до розділу 5   | 218 |
| <b>РОЗДІЛ 6 ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ РУХОМОГО СКЛАДУ</b>   |     |
| <b>ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИМИ ШАРУВАТИМИ ПОКРИТТЯМИ</b>   |     |
| 6.1 Теоретичні основи математичного моделювання процесів електролітичного нанесення покриттів                       | 220 |
| 6.2 Вплив умов електролізу на структуру та механічні властивості електролітичних покриттів                          | 222 |
| 6.2.1 Вплив умов електролізу на структуру залізних покриттів  | 223 |
| 6.2.2 Механічні властивості електролітичних залізних шаруватих покриттів та їх зв'язок із структурою                | 230 |

|   |            |
|---|------------|
| 6.2.2.1 Міцність електролітичного шаруватого заліза. Визначення межі<br>міцності електролітичного заліза  | 233        |
| 6.2.2.2 Міцність зчеплення електролітичних покриттів  | 235        |
| 6.2.2.3 Мікротвердість шаруватих залізних покриттів   | 238        |
| 6.2.2.4 Зносостійкість шаруватих залізних покриттів, отриманих<br>програмно   | 239        |
| 6.3 Властивості шаруватих електролітичних сплавів на основі заліза,<br>отриманих програмним електролізом  | 252        |
| 6.3.1 Сплав залізо-марганець  | 254        |
| 6.3.2 Сплав залізо-фосфор   | 256        |
| 6.4 Міцність з'єднання деталей з гарантованим натягом, відновлених<br>шаруватими покриттями   | 264        |
| 6.5 Нанесення комбінованих шаруватих електролітичних відновлювальних<br>покриттів   | 268        |
| 6.6 Висновки до розділу 6   | 273        |
| <b>РОЗДІЛ 7 ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ВІДНОВЛЕНИХ<br/>ШАРУВАТИМИ ПОКРИТТЯМИ. ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ<br/>ШАРУВАТИХ ПОКРИТТІВ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА<br/>ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗРОБЛЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ</b> | <b>274</b> |
| 7.1 Надійність деталей відновлених шаруватими покриттями  | 274        |
| 7.1.1 Формування поступових відмов  | 274        |
| 7.1.2 Оцінка надійності роботи деталей відновлених шаруватими<br>покриттями   | 278        |
| 7.2 Технологія відновлення деталей рухомого складу наплавленням,<br>технологічні установки, матеріали, режими   | 283        |
| 7.3 Технологія відновлення деталей рухомого складу газотермічним<br>напиленням, технологічні установки, матеріали, режими   | 286        |
| 7.4 Технологія відновлення деталей рухомого складу електролітичними<br>методами, технологічні установки, матеріали, режими  | 287        |

|   |     |
|---|-----|
| 7.5 Техніко-економічне обґрунтування відновлення деталей рухомого складу шаруватими покриттями                                | 289 |
| 7.5.1 Теоретичне визначення раціонального співвідношення «ресурс – вартість» при відновленні деталей рухомого складу          | 289 |
| 7.5.2 Розрахунок економічної ефективності відновлення деталей рухомого складу шаруватими покриттями                           | 292 |
| 7.5.2.1 Техніко-економічна ефективність застосування шаруватого наплавлення деталей рухомого складу залізниць                 | 292 |
| 7.5.2.2 Техніко – економічна ефективність технологій відновлення деталей рухомого складу газотермічними шаруватими покриттями | 293 |
| 7.5.2.3 Техніко – економічна ефективність відновлення деталей рухомого складу електролітичними шаруватими покриттями          | 293 |
| 7.6 Висновки до розділу 7   | 294 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ   | 296 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ  | 301 |
| ДОДАТКИ   | 332 |

## ВСТУП

### Актуальність теми

Залізничний транспорт є найважливішою ланкою господарської діяльності держави, від ефективності роботи якого багато в чому залежить розвиток економіки України. У той же час залізничний транспорт і зокрема, рухомий склад, залежить від економічного стану країни.

Згідно з «Концепцією науково – технічного розвитку рухомого складу залізниць України на 2002 – 2010 р.р.» основним напрямками щодо розвитку локомотивного господарства є: зниження вартості тягового рухомого складу, що придбається; підвищення ефективності використання рухомого складу; підвищення ефективності енергоспоживання тягового рухомого складу; зменшення кількості працівників, зайнятих на технічному обслуговуванні (ТО), поточному ремонті (ПР) та на екіпіруванні [1]. По закінченні вказаного терміну концепції розвитку більшість питань залишаються актуальними.

Державним науково – дослідним центром залізничного транспорту України спільно з фахівцями Укрзалізниці у відповідності з «Державною програмою стратегічного розвитку залізниць України» була розроблена галузева «Програма оновлення тягового рухомого складу залізниць на період до 2020 року», в якій одним із пунктів є створення сучасних систем обслуговування та ремонту рухомого складу з розробкою відповідної нормативної документації [2]. Також розроблено програму розвитку залізничного вантажного рухомого складу [3].

На даний час одними з головних задач залізниці є підвищення швидкості руху, оновлення парку рухомого складу, підвищення ресурсу та надійності експлуатації рухомого складу, збільшення його міжремонтного пробігу, ремонтпридатності та зниження витрат на ремонт. Також залишається актуальною проблема зменшення зносу у трибопарі «колесо – рельс» [4 - 6]. Проблема підвищення надійності та ресурсу деталей є важливою та актуальною не тільки для залізничного транспорту, а і для будь-

якого транспортного засобу [7]. Однією з пріоритетних задач галузі також залишається виведення ремонтного виробництва (локомотиворемонтних заводів, депо) на сучасний рівень. Як відомо, на ремонтні операції при поточному та капітальному ремонтах витрачаються значні кошти, які в сумі можуть перевищувати вартість самої рухомої одиниці. Також відомо, що значна частина розходів припадає на ремонт механічної частини рухомого складу. Тому, очевидно, що для зменшення витрат на ремонт механічного обладнання зі збереженням закладеного рівня надійності, необхідно збільшувати міжремонтні пробіги рухомого складу. Останнє можливо, якщо застосовувати більш зносостійкі матеріали. У той же час, замінювати технологічний і відносно дешевий матеріал всієї деталі на новий, більш дорогий не завжди має сенс, тобто достатньо нанести на основу зносостійкий матеріал на певних ділянках деталі.

Рухомий склад залізниць й особливо механічна частина працює у важких умовах: динамічний вплив колії, повздовжні удари, поперечні коливання в кривих породжують найрізноманітніші зусилля, які викликають появу надмірних зносів, тріщин, зламів і інших дефектів, які можуть бути небезпечними і приводити навіть до аварійних ситуацій. Як показує досвід експлуатації механічної частини рухомого складу, основною причиною відмов та несправностей її елементів є знос та пошкодження контактних поверхонь деталей. У загальному випадку тертя спостерігається при контакті двох тіл і переміщенні одного відносно іншого. В результаті зношення деталей можуть виникати неприйнятні для експлуатації наслідки, наприклад, вібрації, биття, порушення герметичності та режиму змащування, втрата міцності з'єднання для спряжень з гарантованим натягом. Знос, який супроводжується пошкодженнями робочої поверхні деталей такими, як риски, задири, глибинні вириви та інші, зменшує втомну міцність та може приводити до руйнування. На зношування деталей впливає багато факторів, які іноді складно врахувати в математичних моделях. Тому дослідження процесів зношування, моделювання та визначення параметрів моделей з

наступною експериментальною перевіркою є важливою складовою у розв'язанні розглядуваних питань.

При вирішенні таких важливих проблем, як підвищення надійності експлуатації та збільшення ресурсу вузлів і механізмів необхідно підходити комплексно. Розв'язання поставлених проблем можна розбити на модулі, тобто досягати покращення обраних показників на різних етапах життєвого циклу виробу: проектування, виготовлення, експлуатації, ремонту. Кожний модуль можна розділити на підмодулі (блоки) і т.д. В ідеалі, при розробці рухомого складу було б об'єднання в єдину систему всіх модулів, вбираючи існуючий досвід експлуатації рухомих одиниць. І хоча на даний час є намагання реалізації подібної системи щодо рухомого складу, на практиці далеко не завжди отримується позитивний ефект, що можна пояснити великою кількістю можливих реалізацій та недостатністю інструментів моделювання техніко-економічних показників від реалізації того або іншого варіанту.

На сьогодні технології ремонту передбачають відновлення зношених деталей одним суцільним шаром. У той же час, згідно досліджень багатьох науковців у сучасному машинобудуванні та ремонтному виробництві, потенціал відомих матеріалів вичерпано, що змушує здійснювати пошуки матеріалів з новими властивостями, що доречи збігається з законом України № 2519-VI від 09.09.2010 про «Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року», пункту 6 «нові речовини і матеріали». Тобто виникає необхідність розробки нових та удосконалення існуючих технологій ремонту, відновлення та зміцнення деталей. Про необхідність проведення змін у системі обслуговування та ремонту свідчить і наказ № 93-ЦЗ від 30.06.2010 «Про затвердження Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу», який набув чинності з 01.02.2011. Згідно п. 7.4 вказаного наказу необхідно готувати рішення із зміни технологічних процесів та обсягів ремонтних робіт, що має за мету поступовий перехід на систему ремонту з урахуванням технічного стану; згідно п. 8.1, п. 8.2 необхідно створювати спеціалізовані

дорожні дільниці з ремонту перехідного обладнання з відновленням деталей, а також планувати в локомотивних депо відновлення зношених деталей локомотивів. Тому, на нашу думку, одним з перспективних напрямків розвитку ремонтного виробництва є відновлення деталей композиційними, зокрема, шаруватими покриттями. При цьому, шари відновлюючого покриття можуть складатись не тільки з різних металів, а і з одного металу, але з різною структурою.

Застосування шаруватих покриттів найбільш розвинене в мікроелектроніці, при нанесенні захисних та декоративних покриттів; на залізничному транспорті вони фактично не застосовувались. Можливо це обумовлено по-перше, тим, що технологія відновлення шаруватими покриттями дещо ускладнюється у порівнянні з моношаровими; по-друге, досліджень властивостей шаруватих матеріалів явно недостатньо; по-третє, інформація з даного питання містить суперечливі результати, що тягне за собою додаткові складнощі використання шаруватих покриттів у промислових умовах. Однак, не зважаючи на існуючі суперечності, переваги шаруватих покриттів перед моношаровими при певних умовах є безспірними. Враховуючи сказане вище, а також те, що дослідження розглядуваного питання для залізничного транспорту не відомі, виникає необхідність теоретичного обґрунтування використання шаруватих покриттів для відновлення деталей рухомого складу залізниць.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Електрорухомий склад залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна у відповідності з планами науково – дослідних робіт університету, які виконуються в рамках галузевих програм Міністерства інфраструктури України, Укрзалізниці та Придніпровської залізниці за такими темами:

«Розробка нових технологій відновлення деталей і вузлів механічної частини електрорухомого складу», № держреєстрації – 0108U003887;

«Наукове обґрунтування та розробка нових технологій та установки гальванотехнічного відновлення натягу внутрішніх кілець підшипників колісних пар, тягових двигунів і допоміжних електричних машин рухомого складу», № держреєстрації – 0104U006657;

«Підвищення ефективності систем енергопостачання об'єктів залізничного транспорту» частина «Розробка технологій відновлення зношених деталей механічної частини рухомого складу в умовах локомотивного депо», № держреєстрації – 0111U003610, за якими дисертант є виконавцем та автором звітів.

**Метою роботи** є розвиток наукових основ відновлення деталей шаруватими покриттями при ремонті рухомого складу залізниць, що забезпечує вирішення важливої науково-технічної проблеми – підвищення ресурсу та надійності локомотивів та вагонів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **наукові задачі**:

1. Проаналізувати умови експлуатації та встановити кількісні статистичні характеристики зносу деталей механічної частини рухомого складу; обрати типові за взаємодією деталі й оцінити доцільність і можливість використання тієї або іншої технології відновлення при ремонті в умовах структурного підрозділу залізниці.

2. Для обраних деталей встановити закономірності змінювання параметрів стану в процесі експлуатації.

3. Встановити зв'язки між параметрами технологічних процесів відновлення, структурою та властивостями шаруватих покриттів.

4. Розробити математичну модель із визначення раціональних параметрів відновлювального шаруватого покриття деталей рухомого складу при ремонті.

5. Виконати порівняльні прискорені й експлуатаційні випробування на зносостійкість деталей відновлених шаруватими покриттями.

6. Оцінити експлуатаційну надійність відновлених шаруватими покриттями деталей.

7. Розробити ресурсощадні технологічні процеси відновлення деталей механічної частини рухомого складу шаруватими покриттями для умов ремонтного виробництва структурних підрозділів залізниці.

**Об'єкт досліджень** – процеси відновлення та зміцнення деталей при ремонті механічної частини рухомого складу залізниць.

**Предмет досліджень** – деталі та пристрої механічної частини рухомого складу залізничного транспорту.

**Методи досліджень.** Застосовані методи дослідження структури, що включають металографію, рентгеноструктурний фазовий аналіз, рентгеноспектральний мікроаналіз, хімічний аналіз. Використані методи випробування на міцність зчеплення, зносостійкість покриттів, інших механічних властивостей покриттів. Для оцінки показників надійності деталей і технологічних процесів відновлення застосовували методи теорій ймовірностей і надійності.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

Вирішена науково – прикладна проблема підвищення ефективності ремонту локомотивів та вагонів шляхом вибору раціональних технологічних параметрів нанесення відновлювальних шаруватих покриттів з врахуванням поточного стану деталей, що дозволило підвищити ресурс та надійність деталей механічної частини рухомого складу залізниць.

*Вперше:*

- розроблено наукові принципи побудови багатофункціональних шаруватих покриттів для відновлення деталей механічної частини рухомого складу, які враховують зв'язки між технологічними параметрами процесів

нанесення покриттів, структурою, механічними та експлуатаційними властивостями нанесених покриттів;

- теоретично встановлено та експериментально доведено закономірності зміни в процесі експлуатації параметрів стану відновлювальних шаруватих покриттів, які розкривають уявлення про механізми зношування та руйнування шаруватих покриттів;

- розроблено методологію багатокритеріального визначення параметрів шаруватих покриттів раціональних за критеріями ресурсу відновлених деталей, вартості відновлення та продуктивності процесу, яка базується на застосуванні методів векторної оптимізації функцій множини і яка дозволяє підвищити ефективність ремонту деталей механічної частини рухомого складу;

- встановлено раціональні співвідношення товщин шарів електролітичного залізного покриття в залежності від тонкої структури, що дозволяє підвищити зносостійкість до 1,16...1,21 разів, міцність зчеплення до 1,1...1,15 разів, межу втомної міцності до 1,15 разів у порівнянні з моношаровими;

- отримані математичні моделі нанесення шаруватих покриттів, які враховують експлуатаційні властивості покриттів та економічні показники процесу, що дозволяє підбирати раціональні режими, матеріали та технологію відновлення зношених деталей при ремонті рухомого складу, а також прогнозувати їх технічний стан в залежності від пробігу.

*Удосконалено:*

- спосіб шаруватого наплавлення при відновленні крупногабаритних деталей механічної частини рухомого складу, який відрізняється створенням регульованого структурно-фазового складу та властивостей наплавлених шарів, що дозволило підвищити зносостійкість до 3...4,5 разів, втомну міцність до 1,35 разів та зменшити передумови появи тріщин. Зазначений підхід дозволив підвищити ресурс та надійність деталей рухомого складу, що

піддаються високим статичним та ударним навантаженням в процесі експлуатації;

- спосіб підвищення міцності зчеплення газотермічних покриттів при відновленні деталей, який відрізняється від існуючих використанням адгезійних шарів, отриманих програмним електролізом, що дозволяє збільшити міцність зчеплення більше, ніж на 50 % при електродуговому, на 20 % при плазмовому та 12 % при детонаційному напиленні, що суттєво покращує якість ремонту рухомого складу;

- технології відновлення деталей рухомого складу двох- та трьохкомпонентними програмними електролітичними покриттями на основі заліза, які відрізняються від існуючих можливістю пошарового регулювання компонентного складу та отримання шарів з наперед прогнозованими властивостями, що дозволяє підвищити якість ремонтно-відновлюваних процесів та ресурс відновлюваних деталей рухомого складу залізниць.

*Знайшли подальший розвиток* методи оцінки показників надійності відновлених деталей механічної частини рухомого складу, які відрізняються від існуючих врахуванням шаруватої будови покриття, що дозволяє більш точно визначати імовірність безвідмовної роботи цих деталей з врахуванням зносу шарів, як випадкової величини.

### **Практичне значення одержаних результатів**

1. Отримані закономірності зношування деталей механічної частини рухомого складу, відновлених різними методами та розроблені математичні моделі дозволяють прогнозувати їх ресурс і надійність в процесі експлуатації. Запропоновано методикку оцінки надійності роботи деталей відновлених шаруватими покриттями, яка дозволяє визначати імовірність безвідмовної роботи цих деталей з врахуванням зносу матеріалу шарів, як випадкової величини.

2. Користуючись інструментами векторної оптимізації запропонований алгоритм оцінки якості відновлення деталей рухомого складу за декількома

показниками, що дозволяє підвищити надійність технологічних процесів та, відповідно, зменшити кількість браку при відновленні деталей.

3. Отримана математична модель нанесення шаруватих покриттів з врахуванням вартісних показників, що дозволяє підприємству самостійно обирати раціональні режими та технологію відновлення зношених деталей.

4. Запропоновано параметри шаруватого наплавлення зношених деталей механічної частини рухомого складу. Встановлено, що при взаємодії контактних поверхонь знос зразків з наплавленого металу Г13Х13Н2МФ у 3...5 разів нижче, ніж знос зразків з низьковуглецевого низьколегованого металу. Дослідження мікроструктури та мікротвердості поверхневого шару зразків наплавленого металу Г13Х13Н2МФ до і після випробувань показали, що в процесі взаємодії контактних поверхонь відбувається зміцнення зношуваного поверхневого шару за рахунок  $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення, тобто деяка кількість метастабільного аустеніту перетворюється в мартенсит. Товщина зміцненого шару досягає 30 мкм, а його мікротвердість підвищується з 4780 до 5770 МПа, що призводить до збільшення зносостійкості наплавленого металу. При цьому по мірі зношування відбувається зміцнення нових шарів наплавленого металу і його зносостійкість залишається на високому рівні.

5. В результаті аналізу термокінетичної діаграми розпаду аустеніту сталі 38ХС та дослідження термічних циклів наплавлення зразків з цієї сталі порошковим дротом ПП-Нп-Г13Х13Н2М встановлено, що для виключення утворення тріщин в зоні термічного впливу (ЗТВ) та отримання в ній сприятливої бейніто-перлітної структури з твердістю  $\leq$  HV 350 необхідно проводити наплавлення першого шару з погонною енергією  $Q = 22...28$  кДж/см, для чого рекомендується проводити наплавлення на зниженій швидкості ( $\leq 20$  м/год) або з коливаннями наплавочного пальника. Другий і наступні валики (шари) можна наплавляти на більш високих швидкостях і з меншою погонною енергією.

6. Розроблені технології відновлення деталей механічної частини рухомого складу впроваджені та прийняті до впровадження в локомотивних та вагонних депо Придніпровської, Одеської, Південно-Західної залізниць, а

також на ПАТ «Львівський електровозоремонтний завод». Річний економічний ефект для умов структурного підрозділу складає в середньому 880 тис. грн при умові використання зазначених технологій.

7. Застосування запропонованого алгоритму визначення раціональних товщин шарів покриття при заданих витратах, ресурсі або витратах і ресурсі одночасно, дозволяє значно заощадити кошти ремонтного виробництва, при цьому не втрачаючи заданого рівня ресурсу відновленої деталі. Проведення розрахунків при заданих початкових умовах дозволяє спрогнозувати ресурс та вартість нанесеного покриття без проведення додаткових, нерідко, дорогих випробувань.

8. Результати окремих розділів використовуються у навчальному процесі кафедрами «Електрорухомий склад залізниць» та «Технологія матеріалів» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

### **Особистий внесок здобувача**

Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень, які захищаються автором, отримані ним особисто. Внесок здобувача у роботи опубліковані у співавторстві полягає в наступному: збір даних, аналіз умов експлуатації та виникнення дефектів та порушень, що виникають під час експлуатації рухомого складу; постановка задач теоретичних та експериментальних досліджень; планування та аналіз результатів експериментів; самостійне виконання або участь у проведенні експериментів; збір та аналіз статистичних даних зносу елементів механічної частини локомотивів та вагонів; виявлення механізму зношування при терті та підбір матеріалів для відновлення деталей рухомого складу; розробка алгоритмів побудови наборів предикторних змінних стосовно технологічних процесів нанесення відновлювальних покриттів; проведення багатофакторного аналізу з одночасним врахуванням декількох показників якості нанесених покриттів, використовуючи алгоритми векторної оптимізації; розробка математичних моделей процесів відновлення деталей шаруватими покриттями.

## **Апробація результатів дисертації**

Основні положення та результати роботи доповідались і одержали схвалення на наступних Міжнародних науково-технічних конференціях та семінарах: Proceedings of the VI International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering. – Zakopane, Poland, 2004; 4-й Международной научно-технической конференции “Инженерия поверхности и реновация изделий”, (25-27 травня) Ялта, 2004; 65-й Міжнародній науково-практичній конференції Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту, Дніпропетровськ, (19 - 20 травня) 2005; LXVI-й Міжнародній науково-практичній конференції Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту, Дніпропетровськ, (11 - 12 травня) 2006; 67-й Міжнародній науково-практичній конференції Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту, Дніпропетровськ, (24 - 25 травня) 2007; 12-й Міжнародній науково-практичній конференції Проблеми механіки залізничного транспорту, Дніпропетровськ, (24 - 25 травня) 2008; Международной научной конференции “Трансбалтика - 2009”, Вильнюс (22 - 23 апреля) 2009; 10-й Международной научно-технической конференции “Инженерия поверхности и реновация изделий”, (24 - 28 мая) Ялта 2010.; 5-й научно-практической конференции "Модернизация и переоснащение предприятий. Эффективные технологии ремонта и восстановления деталей". - Дніпропетровськ: Експо-центр Метеор, 14 жовтня 2010; 1-й Международной научно-практической конференции “Энергосбережение на железнодорожном транспорте”, Мисхор, (29.09 - 01.10) 2010; 4-й Международной научно-практической конференции “Электрификация транспорта Трансэлектро-2010”, (27-30 сентября) Мисхор, 2010; 70-й Міжнародній науково-практичній конференції Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту (15-16 квітня) Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2010; 5-й Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології”, Київ: ДЕТУТ

(24.03 - 25.03) 2011; 71-й Міжнародній науково-практичній конференції Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту. (14 - 15 квітня) - Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2011; II-й Международной научно-практической конференции “Энергосбережение на железнодорожном транспорте” (Ждениев, 31 мая - 03 июня 2011 г.), 2011; 11-й Международной н/т конференции “Инженерия поверхности и реновация изделий”, (24 - 28 мая) Ялта, 2011; V Международной научно-практической конференции Электрификация транспорта "Трансэлектро-2011" (19-21 декабря) Днепропетровск: ДНУЗТ, 2011; 12-м Международном научно-техническом семинаре Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте. 20-24 февраля 2012, Свалява.: 72-й Міжнародній науково-практичній конференції Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту (19-20 апреля), Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2012; 12-й Международной научно-технической конференции “Инженерия поверхности и реновация изделий”, (04 -08 июня) 2012, Ялта.

### **Публікації**

Результати дисертаційної роботи опубліковано в 65 наукових працях, у тому числі: 35 – у фахових виданнях, 24 – в матеріалах міжнародних конференцій; 4 – патенти на корисну модель; 2 – звіти НДР.