

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна

АРТЕМЧУК ВІКТОР ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 629.4.027:621.79

**НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ
ШАРУВАТИМИ ПОКРИТТЯМИ ПРИ РЕМОНТІ
РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ**

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт
засобів транспорту

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Електрорухомий склад залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
ГЕТЬМАН Геннадій Кузьмич,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, завідувач кафедри «Електрорухомий склад залізниць».

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
КУЛІЧЕНКО Анатолій Якович,
Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, м. Львів; доцент кафедри «Рухомий склад і колія».

доктор технічних наук, професор
ЛЕВКІВСЬКИЙ Олександр Петрович,
Національний транспортний університет, м. Київ;
професор кафедри «Виробництво, ремонт та матеріалознавство»

доктор технічних наук, професор
ТАРТАКОВСЬКИЙ Едуард Давидович,
Українська державна академія залізничного транспорту, м. Харків; завідувач кафедри «Експлуатація та ремонт рухомого складу».

Захист відбудеться «22» листопада 2012 р. о 12.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.820.02 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Акад. В.А. Лазаряна, 2, ауд. 314 (зала засідань).

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

Автореферат розісланий « » 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д-р техн. наук, проф.



І. В. Жуковицький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Залізничний транспорт є найважливішою ланкою господарської діяльності держави. Від ефективності роботи залізниці багато в чому залежить розвиток економіки України. Одними з головних задач залізниці є оновлення парку рухомого складу, підвищення швидкості руху, ресурсу та надійності експлуатації рухомого складу, збільшення його міжремонтного пробігу, зниження витрат на ремонт. Проблема підвищення надійності та ресурсу деталей є важливою та актуальною не тільки для залізничного транспорту, а і для будь-якого транспортного засобу. Однією з пріоритетних задач галузі також залишається виведення ремонтного виробництва (локомотиворемонтних заводів, депо) на сучасний рівень.

Державним науково-дослідним центром залізничного транспорту України спільно з фахівцями Укрзалізниці у відповідності з «Державною програмою стратегічного розвитку залізниць України» 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, а науковцями ДПТУ розроблено програму розвитку залізничного вантажного рухомого складу.

Рухомий склад залізниць і, 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. Як показує досвід експлуатації механічної частини рухомого складу, основною причиною відмов та несправностей її елементів є знос та пошкодження контактних поверхонь деталей. 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 розглянутих питань.

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 необхідно здійснювати пошуки матеріалів з новими властивостями, що доречі 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 пп. 8.1, 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, ускладненням технології; 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 безперечними. Враховуючи сказане вище, а також те, що дослідження розгляданого 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, автором та співавтором 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:

- 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;

- для обраних деталей встановити закономірності змінювання параметрів стану в процесі експлуатації;

- встановити зв'язки між параметрами технологічних процесів відновлення, структурою та властивостями шаруватих покриттів;
- розробити математичну модель із визначення раціональних параметрів відновлювального шаруватого покриття деталей рухомого складу при ремонті;
- виконати порівняльні прискорені й експлуатаційні випробування на зносостійкість деталей відновлених шаруватими покриттями;
- оцінити експлуатаційну надійність деталей, відновлених шаруватими покриттями;
- 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 багатofункціональних 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 методику 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 $\leq \text{HV } 350$ необхідно проводити наплавлення першого шару з погонною енергією $Q = 22...28$ кДж/см, для чого рекомендується проводити наплавлення на зниженій швидкості (≤ 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. Усі наукові положення, розробки та результати теоретичних і експериментальних досліджень, що виносяться на захист, отримані автором особисто. У наукових працях, які опубліковані у співавторстві, особистий внесок автора є наступним:

[3] – розробка математичної моделі процесів електролітичного нанесення покриттів, сформульовані задачі подальших теоретичних досліджень; [4] – на основі орієн-

тованого графа локальних взаємозв'язків розроблені алгоритми побудови наборів предикторних змінних стосовно технологічних процесів нанесення відновлювальних покриттів, зокрема, електролітичними методами; [5] – постановка задачі, проведення багатофакторного аналізу з одночасним врахуванням декількох показників якості нанесених покриттів, використовуючи алгоритми векторної оптимізації; [8] – проведення теоретичних досліджень, математичне моделювання планування експериментів за декількома показниками; [9] – збір та аналіз статистичних даних зносу елементів автозчепних пристроїв; [10] – проведення теоретичних досліджень по виявленню механізму зношування при терті на прикладі роботи поглинального апарату пружино-фрикційного типу; [13-15] – планування, проведення та аналіз результатів експериментальних досліджень процесів зношування нанесених покриттів; [17, 24] – участь у плануванні, проведенні та аналізі результатів експериментів, проведення розрахунків за складеними математичними моделями; [23, 25, 26, 36] – планування, участь у проведенні та аналізі результатів експериментів, підбір матеріалів для відновлення деталей механічної частини рухомого складу; [28] – проведення розрахунків за складеними математичними моделями, що моделюють нелінійні електрохімічні кола з імпульсними джерелами живлення; [29] – проведення порівняльного аналізу методів відновлення, планування експериментів, виконання експериментальних досліджень, аналіз та теоретичне обґрунтування результатів експериментів; [34] – збір даних, аналіз умов експлуатації та виникнення дефектів та порушень, що виникають під час експлуатації рухомого складу; [27] – збір та аналіз статистичних даних якості наплавлення деталей, розробка структурних моделей, рекомендації щодо підвищення надійності та якості наплавлення деталей рухомого складу; [40] – проведення аналізу, обґрунтування використання та дослідження механічних властивостей шаруватих металевих композитів; [38] – виконання експериментальних досліджень, розробка джерела живлення установки, аналіз результатів; [39] – виконання експериментальних досліджень, аналіз результатів, розробка технологій, написання 70 % розділів; [42] – участь у моделюванні електрохімічних кіл з імпульсними електричними джерелами живлення; [44] – розробка параметрів імпульсного електролізу; [43, 54, 60-63] – ідеї, основні положення та виклад основного матеріалу. Наукові праці [1, 2, 7, 11, 12, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 30-33, 35, 41, 45-53, 55-59, 64, 65] виконані автором одноосібно.

Апробація результатів дисертації. Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалась на:

- науковому семінарі кафедри «Електрорухомий склад залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (протокол № 10 від 16 травня 2012 р.);

- V-й міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології», – ДЕТУТ, 24 – 25 березня 2011 р., м. Київ;

- 71-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» ДНУЗТ, 14 – 15 квітня 2011 р., м. Дніпропетровськ;

- міжкафедральному науковому семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (протокол № 13 від 19.06.12) кафедр «Електрорухомий склад залізниць», «Електропостачан-

ня залізниць», «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», «Вагони», «Прикладна математика», «Локомотиви», «Теоретичні основи електротехніки», «Технологія матеріалів», «Колія та колійне господарство», «Економіка і менеджмент на транспорті», «Автоматизований електропривод»; а також основні результати доповідались автором на 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», (25-27.05) Ялта, 2004; 65-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, (19-20.05) 2005; LXVI-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, (11-12.05) 2006; 67-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, (24-25.05) 2007; 12-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми механіки залізничного транспорту», Дніпропетровськ, (24-25.05) 2008; Международной научной конференции «Трансбалтика-2009, Вильнюс (22-23.04) 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», (27-30.09) Мисхор, 2010; 70-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (15-16.04) 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» (14-15.04) Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2011; II-й Международной научно-практической конференции «Энергосбережение на железнодорожном транспорте» (Ждениево, 31.05-03.06.2011 г.), 2011; 11-й Международной н/т конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий», (24-28.05) Ялта, 2011; V Международной научно-практической конференции Электрификация транспорта «Трансэлектро-2011» (19-21.12) Днепропетровск: ДНУЗТ, 2011; 12-м Международном научно-техническом семинаре «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте» 20-24.02.2012, Свалява; 72-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (19-20.04), Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2012; 12-й Международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности и реновация изделий», (04-08.06) 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.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків, переліку використаної літератури та десяти додатків. Основний текст роботи викладено на 278 сторінках. Дисертація містить 120 рисунків і 21 таблицю; рисунки і таблиці, які розміщені на окремих сторінках, займають 22 сторінки. Список використаних джерел із 299 найменувань приведений на 31 сторінці, додатки на 144 сторінках. Повний обсяг дисертації складає 475 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційних досліджень, сформульовані мета і основні напрямки 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 показано сучасний стан досліджуваної проблеми. Представлено конструктивно-технологічні характеристики вузлів механічної частини рухомого складу залізниць. Проблемам покращення експлуатаційних якостей залізничного рухомого складу присвячено наукові праці багатьох вітчизняних та закордонних вчених, а саме Анісімова П.С., Блохіна Є.П., Боднаря Б.Є., Босова А.А., Бороненко Ю.П., Бубнова В.М., Бутко Т.В., Буше М.О., Гетьмана Г.К., Голубенко О.Л., Горбунова М.І., Горобця В.Л., Губачевої Л.О., Дьоміна Ю.В., Іншакова М.М., Капіци М.І., Кельріха М.Б., Коротенко М.Л., Куліченко А.Я., Курасова Д.О., Лазаряна В.А., Лужнова Ю.М., Маркова Д.П., Мямліна С.В., Маслієва В.Г., Осеніна Ю.І., Савчука О.М., Самсонкіна В.М., Скалозуба В.В., Старченко В.М., Тартаковського Е.Д., Тимофєєвої Л.А., Ткаченко В.П., Ушкалова В.Ф., Челнокова М.М., Четвергова В.О. та ін.

Проаналізовані умови експлуатації деталей механічної частини рухомого складу та встановлені кількісно-статистичні характеристики зносу. Проблемам інженерії поверхні присвячені дослідження багатьох вчених: Дальського А.М., Дмитриченко М.Ф., Гриба В.В., Джонсона К., Дихи О.В., Клименко С.А., Костецького Б.І., Крагельського І.В., Кузьменко А.Г., Пронікова О.С., Рейнера М., Ришова Е.В., Солдатенкова І.А., Сушова А.Г., Хрушова М.М., Черновола М.І., Чичинадзе А.В., та ін.

Підкреслимо, що деталі та вузли механічної частини є важливою складовою забезпечення виконання функцій залізничного рухомого складу, а їх стан безпосередньо впливає на безпеку руху. Однак відсутність статистичних даних зносу більшості деталей механічної частини свідчить про недостатній контроль за поточним технічним станом рухомого складу, при цьому частка несправних локомотивів є доволі високою, що пов'язано з багатьма причинами, аналіз яких подано в роботі. Крім того, аналіз статистичних даних виходу з ладу локомотивів показав, що ресурс багатьох деталей механічної частини недостатній й потребує підвищення.

У якості відновлювальних на ремонтних підприємствах залізниці у найбільшій мірі використовують наплавлення, газотермічне напилювання та електролітичні методи. Кожний з зазначених методів займає своє місце у ремонтному ви-

робництві та може бути використаний в залежності від умов експлуатації, конструктивних особливостей деталей, матеріалів, можливостей підприємства та ін. Крім того, в роботі показано, що існують випадки, коли доцільно поєднувати вказані методи відновлення. Проте, як показує аналіз на більшості ремонтних підприємств залізничного транспорту використовують лише одну технологію відновлення деталей, що далеко не завжди є техніко-економічно обґрунтованим. Проблематиці відновлення деталей зазначеними методами присвячено наукові праці багатьох вчених: Астахова Є.А., Баженова О.В., Борисова Ю.С., Калмуцького В.С., Коржа В.М., Коробочки О.М., Костіна М.О., Кудінова В.В., Кузнецова В.Д., Купріянова І.Л., Левківського О.П., Петрова Ю.М., Посвятенко Е.К., Рябцева І.О., Сидорчука О.В., Студента М.М., Фруміна С.І., Харламова Ю.О., Хасуї А., Ющенко К.А. та ін.

Одним із шляхів підвищення ресурсу деталей є застосування композиційних, а саме шаруватих покриттів. Дослідження композиційних матеріалів висвітлено у наукових працях вітчизняних та закордонних вчених: Астрова Є.І., Браутмана Л., Короля В.К., Крока Р., Ляшенко Б.А., Победрі Б.Є., Портного К.І., Черновола М.І. та ін. Згідно даних літературних джерел шаруваті матеріали використовують для виробів у вигляді заготовок, як правило, прокатних листів або труб. Враховуючи перспективність даного напрямку наукових досліджень, в дисертаційній роботі представлені результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень із можливості застосування шаруватих покриттів у ремонтному виробництві залізниці. Для виконання останнього сформульовані напрями розробки ефективних ресурсозберігаючих технологій на базі найбільш використовуваних на ремонтних підприємствах залізниці.

У другому розділі викладено методики експериментальних досліджень, а також представлено математичне моделювання планування експериментів.

У третьому розділі представлено теоретичне обґрунтування формування зносостійких шаруватих покриттів. Підвищення надійності експлуатації та збільшення ресурсу вузлів і механізмів тягового рухомого складу та вагонів є складною проблемою, оскільки зазначені параметри залежать від множини факторів, тому для розв'язання даної проблеми необхідний комплексний підхід. Пошуки шляхів підвищення ресурсу деталей механічної частини рухомого складу здійснювали в рамках етапу (модулю) ремонту. У першому наближенні для розв'язання поставлених задач в роботі враховували умови експлуатації, матеріал та геометричні параметри деталей, визначали механізми зношення та структурні перетворення матеріалів деталей, після чого підбирали раціональні методи і режими відновлення деталей. В роботі представлені особливості формування шарів та їх вплив на властивості покриття при наплавленні, газотермічному напиленні та електролітичних методах.

У даному розділі показано, що відновлювальні покриття можна представити у вигляді реологічних моделей. Так, наприклад, при електролітичному відновленні або газотермічному напиленні, перший шар який безпосередньо осаджується (напилюється) на деталь (адгезійний), повинен мати міцне з'єднання з основним матеріалом і володіти певним опором по відношенню до сколювання та відшаровування. Такий шар можна моделювати тілом Бінгама, реологічна фор-

мула якого має вигляд $B = H - (N|Stv)$.

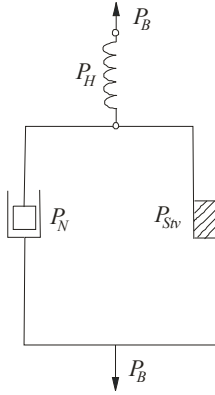


Рис. 1 – Схема моделі тіла Бінгама

Механічна схема тіла Бінгама (B) представлена на рис. 1. Наявність в даній моделі тіла Сен-Венана (Stv) дозволяє відобразити здатність даного шару опиратися сколюванню або міцність зчеплення (адгезія) з основним матеріалом деталі. В термінах напружень і деформацій для тіла Бінгама маємо

$$\sigma = \begin{cases} 2\mu u, & \text{якщо } |\sigma| < |\vartheta|; \\ 2\eta u + \vartheta, & \text{якщо } |\sigma| \geq |\vartheta|, \end{cases}$$

де ϑ – характеристика зчеплення (адгезії).

У граничному випадку, коли $\mu = 0$; $\eta = 0$ або при достатньо малих їх значеннях основною властивістю даного шару буде властивість зчеплення з матеріалом деталі. Другий шар (робочий) буде проміжним між першим і третім шаром. Третій (верхній) шар контактує з іншими деталями. Показана одна із ситуацій, коли покриття умовно складається як мінімум з трьох шарів, причому перший шар (адгезійний) відносно деталі може переміщатися (прослизати) тільки тоді, коли дотичне напруження на поверхні розділу перевершує граничне напруження, тобто міцність зчеплення. Що стосується третього шару (верхнього в покритті), то він може переміщатися відносно першого в певних межах. Іншими словами, проміжний шар (другий) може «текти» і повинен гасити дотичне напруження від третього шару, що контактує з іншим тілом (рис. 2).

Допускаючи, що деформації тіл малі для тензора деформацій маємо вираз

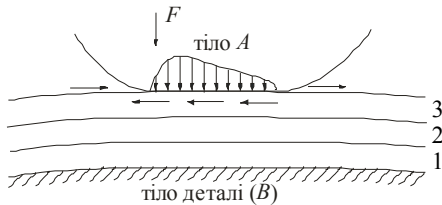


Рис. 2 – Схема контакту відновленої деталі

$$u_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right).$$

Поблизу точки дотику рівняння поверхні тіла A запишемо у вигляді $z = \chi_{\alpha\beta} x_\alpha x_\beta$, причому по α, β проводиться підсумовування від 1 до 2.

Тензор $\chi_{\alpha\beta}$ – двовимірний симетричний тензор, що характеризує кривизну поверхні тіла A . Так само для поверхні покриття маємо $z' = \chi'_{\alpha\beta} x_\alpha x_\beta$, де вісь z' направлена протилежно осі z . Під дією прикладених сил поблизу точки первинного зіткнення на поверхні тіл виникає втискування, і тіла стикатимуться по деякій кінцевій ділянці, що є областю контакту. Оскільки матеріали контактуючих тіл мають різні константи ν і E , то контактний тиск P_z викликає тангенціальні переміщення на поверхні контакту і у кожній поверхні вони будуть свої, що приводить до прослизання. Дане прослизання до деякої міри може стримуватися тертям. Тому в центральній частині контакту матиме місце повне зчеплення, а прослизання можливе тільки в зоні, що примикає до межі області контакту. У разі, коли коефіцієнт граничного тертя достатньо великий, то прослизання може повністю виключитися. Якщо F – нормальна сила, що здавлює тіла (рис. 2), то за відсутності сил тертя область контакту визначається теорією Герца. Проте при ковзаючому контакті реальних тіл виникають дотичні зусилля тертя Q , що діють по поверхні кожного тіла в напрямі, протилежному руху. Оче-

видно, що дотичні зусилля, які діють на поверхні кожного тіла в області контакту, однакові по величині і протилежні за напрямом, тоді, якщо $q_A(x, y)$ – дотичне зусилля на поверхні тіла A , а $q_C(x, y)$ – для шару, то $q_A(x, y) = -q_C(x, y)$ і, враховуючи представлення для u_z і u'_z , отримаємо $\frac{E}{1-2\nu}u_z(x, y) = -\frac{E'}{1-2\nu'}u'_z(x, y)$. З останнього витікає, що дотичні зусилля знаходяться у взаємній залежності з нормальним тиском. Якщо коефіцієнт тертя значно менше одиниці, то вплив дотичних напружень на розподіл нормальних і на область контакту мале та можна вважати, що дотичні і нормальні напруження незалежні. Отже, напружено-деформований стан може бути визначений їх суперпозицією. Виконаний у роботі аналіз дозволяє застосовувати реологічні моделі при дослідженні зносу контактуючих тіл, а також використовувати запропоновані способи для вимірювання реологічних властивостей тіл (шарів) відновлених деталей.

У роботі розглянуто вплив структури шаруватих покриттів на деякі механічні властивості. На нашу думку нехтувати даним питанням неможна, оскільки, як відомо, властивості матеріалів суттєво залежать саме від структури матеріалів. Згідно теоретичних даних шарувата структура покриття дозволяє впливати на рух дислокацій та чинити опір їх виходу на поверхню, що обумовлено створенням потенціальних бар'єрів на шляху руху дефектів кристалічної ґратки. На основі аналізу зміни дислокаційної структури при зовнішньому терті можна припустити, що сила тертя пов'язана зі змінами дислокаційної структури, які виникають на поверхнях тертя. Впливати на структуру шарів відновлювальних покриттів в залежності від методу їх нанесення можна за допомогою використання різних матеріалів або змінюючи режими технологічного процесу, або комбінуючи обидва варіанти.

У даному розділі також представлені математичні моделі зношування деталей рухомого складу з уточненими параметрами; розглянуті контактні напруження контактуючих деталей. Зазначене дозволило перейти до моделювання контактної взаємодії поверхонь та зносу шаруватих покриттів.

В роботі побудовані математичні моделі зносу контактуючих тіл з шаруватими покриттями. Для контактних пар, що найбільш часто зустрічаються отримані диференціальні рівняння зносу кожного покриття та отримано умови визначення строку служби пари. Розглянемо взаємодію двох плоских смуг. Нехай тіло G_1 має багатшарове покриття товщиною h_1 , а тіло G_2 – h_2 . Рух тіла G_1 відносно G_2 проходить уздовж осі z . Швидкості зносу отримаємо у вигляді $v_1 = \alpha_1 \frac{P^{m_1}}{B_1}$; $v_2 = \alpha_2 \frac{P^{m_2}}{B_2}$, де m_1, m_2 – показники нелінійності по відношенню до тиску; B_1, B_2 – опори зносу відповідних шарів, які є функціями товщини шарів; α_1, α_2 – коефіцієнти, залежні від відносної швидкості і мікрогеометрії поверхні тертя.

Величина опору зносу B_2 залежить від локальних властивостей покриття і області контакту, тобто B_2 визначатиметься співвідношенням $B_2 = \int_{-a}^a r_2(x, y) dx$, де $r_2(x, y)$ – локальний опір, а (x, y) – точка поверхні контакту.

При чисельному рішенні зручно привести початкові диференціальні рівняння до безрозмірного вигляду

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{h}_1}{d\tau} = -\tilde{v}_1(\tilde{h}_1); \\ \frac{d\tilde{h}_2}{d\tau} = -\tilde{v}_2(\tilde{h}_2); \end{cases}$$

за початкових умов $\tilde{h}_1(0) = h_{10}$; $\tilde{h}_2(0) = h_{20}$, де $\tau = v_0 \cdot t$; $\tilde{v}_1 = v_1 / v_0$; $\tilde{v}_2 = v_2 / v_0$; $\tilde{h}_i = h_i / h_0$; $i = \overline{1, 2}$.

У якості v_0 можна узяти $v_0 = \frac{\alpha_0 P^m}{2a \cdot r_0 \cdot h_0}$, де $\alpha_0 = \max\{\alpha_1, \alpha_2\}$; $m = \max\{m_1, m_2\}$; r_0 – базовий опір зносу, $h_0 = \max\{h_{10}, h_{20}\}$.

А знос двох плоских смуг з урахуванням взаємного впливу визначаємо, виходячи з припущення, що швидкість зносу будь-якого тіла зворотнопропорційна опору зносу цього тіла і прямопропорційна опору зносу іншого тіла. Тоді

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{h}_1}{d\tau} = -\tilde{v}_1(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2); \\ \frac{d\tilde{h}_2}{d\tau} = -\tilde{v}_2(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2) \end{cases}$$

Розглядаючи покриття товщиною h_1 тіла G_1 та аналогічно для тіла G_2 , як багатошарові (три і більш шарів), отримуємо в загальному вигляді опір зносу багатошарового покриття

$$\begin{aligned} r_1(h_1) &= r_{1n} H(h_1 - y_{1n-1}) + \sum_{i=1}^{n-1} r_{1i} (H(y_{1i} - h_1) - H(y_{1i-1} - h_1)), \\ r_2(h_2) &= r_{2n} H(h_2 - y_{2n-1}) + \sum_{i=1}^{n-1} r_{2i} (H(y_{2i} - h_2) - H(y_{2i-1} - h_2)), \end{aligned}$$

де y_{1i} , y_{2i} – координати шарів; n – число шарів покриття.

В роботі також розглянуто випадок взаємодії циліндричних поверхонь на прикладі підшипника ковзання, контактуючі поверхні якого мають шарувате покриття. Обчисливши модулі градієнтів поверхонь ∇F_1 , ∇F_2 , отримуємо рівняння, якому задовольняє $h_2(x, y, t)$

$$\frac{\partial h_2(x, y, t)}{\partial t} + v_{2N} \sqrt{1 + \frac{2}{R_2 - h_2} \left(x \frac{\partial h_2}{\partial x} + y \frac{\partial h_2}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial h_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial h_2}{\partial y} \right)^2} = 0.$$

У полярній системі координат, узявши за полярну вісь – вісь y і кут φ , що відлічується від осі y проти годинникової стрілки, отримаємо

$$\frac{\partial h_2(y, \varphi, t)}{\partial t} + v_{2N} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial h_2(y, \varphi, t)}{\partial \varphi} \right)^2 \frac{1}{(R_2 - h_2)^2}} = 0.$$

У четвертому розділі розглянуто відновлення деталей рухомого складу шаруватим наплавленням. Виходячи з умов експлуатації, характеру та величини зносу (проведено статистичний аналіз), одними з найбільш зношуваних деталей є деталі автозчепного пристрою та п'ятникового вузла, які й були обрані для подальшого розгляду. Технології відновлення деталей автозчепів та

п'ятникового вузла, що застосовують на даний час, не забезпечують високого ресурсу вказаних деталей, отже, вивчення проблеми зношування і відновлення ударно-тягових пристроїв є актуальним і потребує глибокого вивчення.

Для з'ясування механізмів формування пластичних деформацій та рельєфу поверхонь, що співударяються було проведено моделювання ударів, лабораторні та натурні дослідження (рис. 3, 4), що дозволило оцінити напружено-деформований стан досліджуваних поверхонь. Автозчепи різних локомотивів і вагонів, які мали нові та відновлені до креслярських розмірів поверхні, піддавали періодичному огляду.

Таким чином, визначали формування рельєфу поверхні залежно від пробігу. В результаті

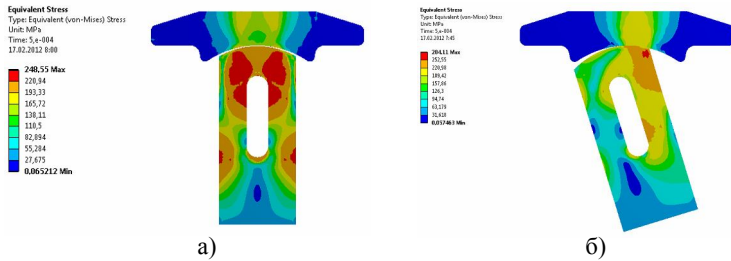


Рис. 3 – Розподіл напружень у хвостовику корпусу автозчепу в момент дії навантаження (1 МН): а) при прямому ударі; б) при ударі під кутом

проведених досліджень у роботі представлено виявлені характеристики та механізми зношування зазначених деталей. Встановлено, що в процесі експлуатації рухомого складу на ударні поверхні одночасно впливає складна комбінація механізмів зношування, а саме зминання, втомлений, абразивний, адгезійний, а в п'ятниковому вузлі з часом додається корозійно-механічний. Останні два є конкуруючими між собою. З'ясування механізму зношування дозволяє визначити напрям подальших досліджень з метою підбору зносостійких матеріалів для

відновлення деталей наплавленням.

В роботі розглянуто властивості та зварюваність вуглецевих сталей, що застосовують при виготовленні зазначених деталей. Проаналізовані причини появи тріщин, які виникають при наплавленні зношених деталей; показано, що за рахунок зміни погонної енергії та регулювання термічного циклу наплавлення, можливо припустити підвищення стійкості зони термічного впливу (ЗТВ) проти

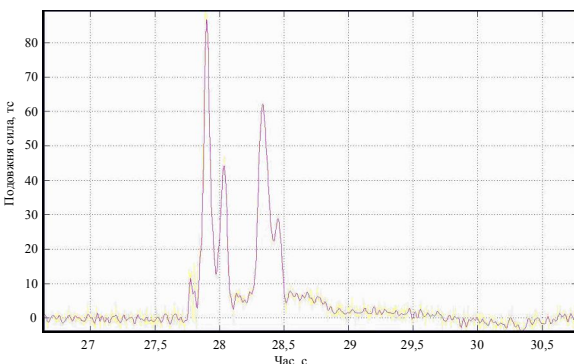


Рис. 4 – Осцилограма удару (швидкість співудару 3,8 км/год)

утворення тріщин при наплавленні і, як результат, збільшити надійність відновлених наплавленням деталей.

Наступним кроком є вибір матеріалів для наплавлення деталей рухомого складу. Одним із перспективних у застосуванні є матеріали аустенітного класу, які дозволяють проводити наплавлення вуглецевих і високовуглецевих сталей без або з мінімальним підігрівом.

З огляду на умови експлуатації деталей автозчеплення і п'ятникового вузла, а також необхідності забезпечення високої якості та надійності з'єднання наплавленого шару і основного металу для відновлення цих деталей методами дугового наплавлення в роботі запропоновано використовувати порошковий дріт ПП-Нп-Г13Х13Н2МФ, що забезпечує отримання наплавленого металу зі структурою метастабільного аустеніту, який зміцнюється в процесі експлуатації в результаті дії уда-

рів різної інтенсивності.

Проведені дослідження властивостей наплавлених шарів. Мікротвердість в зоні сплавлення при наплавленні зразків зі сталі 45 зазначеним дротом показано на рис. 5. Аналіз зони сплавлення показав відсутність різного роду дефектів та, відповідно, високу якість наплавлення.

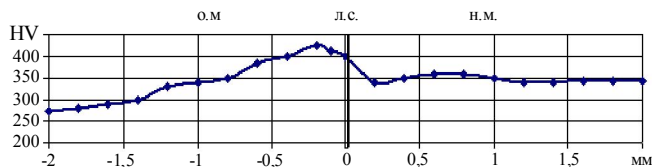


Рис. 5 – Мікротвердість зони сплавлення сталі 45 і металу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-Г13Х13Н2МФ:
о.м. – основний метал; л.с. – лінія сплавлення; н.м. – наплавлений метал

нічні властивості якісної катаної вуглецевої сталі 20 за ГОСТ 1052: $\sigma_T = 250$ МПа; $\sigma_B = 410$ МПа; відносне подовження – 25%; відносне звуження – 55 %. Таким чином, наплавлений метал по міцнісним властивостям перевершує сталь 20 і дещо поступається їй за пластичними властивостями.

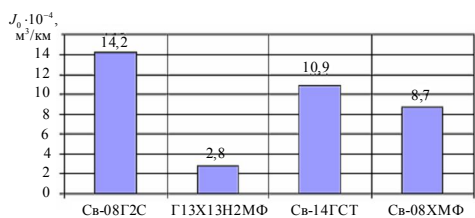


Рис. 6 – Знос зразків наплавленого металу різного складу

Досліджено зносостійкість наплавленого металу Г13Х13Н2МФ в порівнянні з наплавленим металом типу сталей 08Г2С, 08ХМФ і 14ГСТ, тобто з тими матеріалами, які в даний час широко застосовують при відновленні обраних деталей. Зносостійкість досліджували при терті металу по металу, при цьому у якості контртіла використовували зразки зі сталі 45 (рис. 6). Встановлено, що знос зразків наплавлених дротом Г13Х13Н2МФ в 3...5 разів нижче, ніж знос зразків з низько-вуглецевого низьколегованого металу. Знос контртіла зі сталі 45 при його випробуваннях також був мінімальним.

Дослідження мікроструктури і заміри мікротвердості поверхневого шару зразків наплавленого металу Г13Х13Н2МФ до і після випробувань на зношування при терті металу по металу показали, що в процесі зношування відбувається зміцнення 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.

Наступним кроком в роботі є обґрунтування вибору матеріалів при відновленні деталей рухомого складу залізниць шаруватим наплавленням. Проведені дослідження показали, що наплавлення пластичного підшару (в експериментах використовували дріт Св08Г2С) підвищує запас втомної міцності $\approx$ на 35 %. В роботі наведені раціональні співвідношення шарів, що наплавляються. Узагальнюючи дане питання, можна зазначити, що доцільна товщина перших наплавлених шарів з пластичного матеріалу складає до 30 % від загальної товщини наплавлення, забезпечуючи таким чином підвищення демпфуючих властивостей, втомної міцності, а також здешевлення вартості наплавлення, що в цілому відбивається на вартості ремонту рухомого складу.

У дисертаційній роботі проведена оцінка якості та надійності технологічних процесів наплавлення деталей рухомого складу залізниць, оскільки підвищення надійності будь-якого технологічного процесу є актуальною та важливою проблемою всіх сфер виробництва, у тому числі й ремонтного на залізничному транспорті.

Розроблено рекомендації відносно вибору режимів, технології і техніки шаруватого наплавлення, що забезпечують високу якість і надійність експлуатації обраних деталей.

У п'ятому розділі розглянуто відновлення деталей рухомого складу шаруватими газотермічними покриттями. Загальноприйнято поділяти газотермічне напилення (ГТН) на основні чотири групи: електродугове, газополум'яне, плазмове та детонаційне, інші варіанти є різновидами зазначених. При виборі тієї або іншої установки ГТН, як правило, керуються техніко-економічними показниками. Найважливішими факторами, що визначають ефективність роботи установки є вихідні показники, які характеризують властивості відновлювального покриття: міцність зчеплення покриття з основою, зносостійкість, вплив на втомлену міцність деталі, твердість, корозійну стійкість.

У даному розділі розглянуті технології газотермічного напилення лише з точки зору отримання ефективних експлуатаційних властивостей покриттів, враховуючи наявність того або іншого обладнання на підприємстві.

До деталей механічної частини рухомого складу, які доцільно відновлювати газотермічними методами перш за все можна віднести циліндричні деталі, а саме валики, вісі, цапфи, колінчасті вали. Враховуючи достатньо велику кількість валиків, не викликає сумніву доцільність їх відновлення. Найбільшу кількість серед валиків у рухомому складі має гальмівна важільна передача (ГВП). Згідно статистичних даних середня величина зносу ГВП локомотивів становить 1,93 мм, вантажних вагонів – 1,67 мм на діаметр; максимальні значення зносу валиків ГВП досягають 3 мм., стандартне відхилення – 0,38 мм. Середній знос валиків ресорного підвішування становить 2,12 мм, стандартне відхилення – 0,35 мм. Встановлено, що у розглядуваному вузлі діє механічне зношування, причому переважно втомлене. До вказаного механізму з часом додається корозійно-механічний у корозійно-окислювальній формі.

Напилення (плазмове, плазмово-дугове та детонаційне) проводили спільно з фахівцями ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Шаруватість покриття отримували, змінюючи співвідношення складових напилюваних матеріалів. Важливою позитивною властивістю газотермічного напилення є можливість створення при певних умовах аморфно-кристалічної, а в деяких випадках і аморфної структури, що дозволяє підвищити зносостійкість, корозійну стійкість, покращити адгезію та когезію частинок. Одночасна дія високої міцності та пластичності сприятливо діє на зносостійкість покриття, причому, як показали експерименти, і при сухому, і при граничному терті. Тому такі покриття можна розглядати, як перспективні для застосування у ремонтній практиці залізниць.

При плазмово-дуговому напиленні щільність покриттів, отриманих розпиленням суцільних дротів становила 93...96 %, міцність зчеплення з основою сягала 60 МПа (за штифтовою методикою). За результатами РСФА металевий шар з суцільних металевих дротів має кристалічну структуру. Мікротвердість

робочого шару (дріт 65Г) складає 5610 ± 1500 МПа.

Для побудови зносостійкого шаруватого покриття, отриманого детонаційним напиленням, використовували різні матеріали, у тому числі ПС-12НВК та аморфізовані сплави на основі заліза. На підставі результатів триботехнічних випробувань встановлено, що шаруваті аморфні детонаційні покриття зі сплавів на основі заліза в умовах граничного та сухого тертя мають зносостійкість, яка значно перевищує зносостійкість конструкційних та інструментальних сталей, і, навіть термічно та хіміко-термічно оброблених сталей. Так, наприклад, при сухому та граничному терті детонаційні шаруваті покриття із сплавів системи Fe-Cr-B-Si з переважно аморфною структурою мають у 1,7...2,8 рази менші значення лінійного зносу в порівнянні з цементованою сталлю 20Х (рис. 7), що є вельми суттєвим. На рис. 9 за 1 брали конструкційну Ст45 загартовану с.в.ч. на глибину 2 мм.

У даному розділі також розглянута важлива задача підвищення міцності зчеплення покриття з основою деталей. В роботі отримали подальший розвиток дослідження І.Л. Купріянова, який у якості підшарів використовував електролітичні покриття. Відмінність і розвиток цього напрямку полягає в розширенні методів та матеріалів напилення. Новизною проведених дослідних робіт також є нанесення адгезійних шарів (підшарів) за допомогою програмного електролізу (режими нанесення електролітичних шарів розроблені автором). В результаті експериментів застосування адгезійних «м'яких» цинкових шарів при електродуговому напиленні дозволило підвищити $\sigma_{зч}$ з 23 МПа (без підшару) до 28...30 МПа (стаціонарний режим) та 32...35 МПа (програмний електроліз). Підвищення $\sigma_{зч}$ також спостерігалось для плазмових покриттів на 20 % і детонаційних – 12 % (для підшарів, отриманих програмним електролізом).

В роботі представлено теоретичне визначення працездатності шаруватих газотермічних покриттів, а також визначення раціональних параметрів шаруватого покриття при відновленні зношених деталей газотермічними методами. Представимо алгоритм розв'язання поставленої задачі на прикладі тришарового покриття. Нехай r_0 – радіус зношеної деталі, яку необхідно відновити; c_i – вартість нанесеного матеріалу i -го шару; u_i – інтенсивність зношування i -го шару; h_i – товщина i -го шару; H – загальна товщина (задана) нанесеного покриття (рис. 8). Виразимо товщину нанесеного покриття H через складові h_1 , h_2 та h_3 : $h_1 + h_2 + h_3 = H$. Об'єм матеріалу, що наноситься на відновлювальну деталь V_1, V_2, V_3 .

Введемо оцінку витрат на матеріали в залежності від геометричних параметрів нанесених шарів покриття при одиничній довжині деталі (зразка):

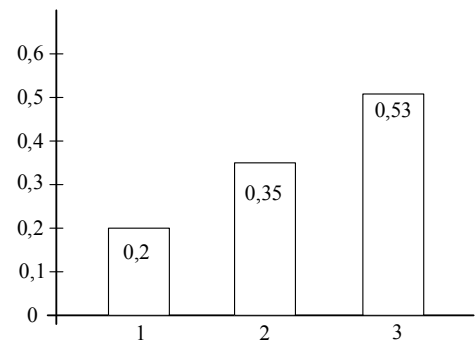


Рис. 7 – Інтенсивність зношування аморфних покриттів із сплавів при граничному терті:
1 - $\text{Fe}_{70}\text{Cr}_{15}\text{B}_{11}\text{Si}_4$ 2 - $\text{Fe}_{70}\text{B}_{21}\text{-C}_3$
3 - цементованої сталі 20Х

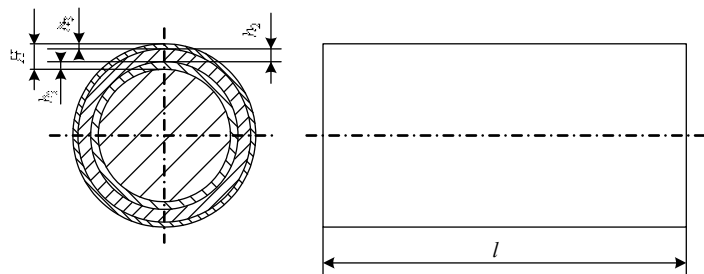


Рис. 8 – Схема розташування шарів покриття при відновленні зношених циліндричних деталей

$$z = C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + C_3 \cdot V_3.$$

Ресурс (пробіг, термін служби) визначимо як: $T = h_1 / u_1 + h_2 / u_2 + h_3 / u_3$. Ресурс деталі може бути виражений у кілометрах пробігу або годинах роботи і залежить від постановки задачі. Виходячи із умови про те, що вартість процесу має прагнути до мінімуму, а ресурс – до максимуму, приходимо до задачі векторної оптимізації. Графічно область можливих рішень представляє собою трикутник, тільки в межах якого можуть знаходитись точки рішення задачі. Точки M , M_1 – допустимі рішення задачі векторної оптимізації. $M_1 = \alpha A + (1 - \alpha)B$, $M = \beta M_1 + (1 - \beta)C$, причому $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta \leq 1$, де α , β – безрозмірні параметри, за допомогою яких описується будь-яка точка, що знаходиться на даному трикутнику. Тоді ресурс відновленої деталі ГП буде $T = \frac{\alpha\beta H}{u_1} + \frac{(1-\beta)H}{u_2} + \frac{\beta(1-\alpha)H}{u_3}$. А з урахуванням α , β з буде

$$z = C_1 \pi (2\alpha\beta H r_0 + \alpha^2 \beta^2 H^2) + C_2 \pi (2(1-\beta)H(r_0 + \alpha\beta H) + (1-\beta)^2 H^2) + C_3 \pi (2\beta(1-\alpha)H(r_0 + \alpha\beta H + (1-\beta)H) + \beta^2(1-\alpha)^2 H^2)$$

Графічне представлення результату розв'язання задачі знаходження раціональних товщин шарів представлено на рис. 9, а множину можливих рішень можна представити у вигляді (рис. 10).

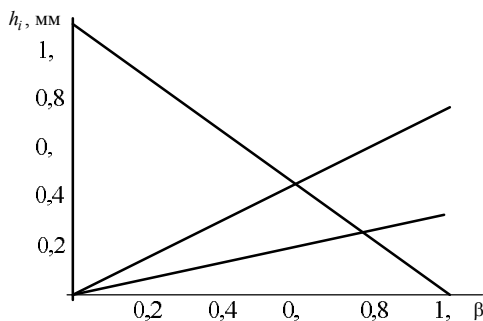


Рис. 9 – Розподіл товщин шарів при фіксованому значенні α

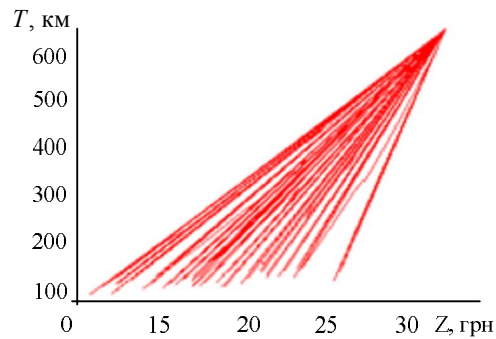


Рис. 10 – Залежність ресурсу покриття від вартості з урахуванням товщин шарів

Розроблений алгоритм на базі векторної оптимізації дозволяє повністю автоматизувати процес розрахунку раціональних параметрів покриття, залишаючи варіанти, не зрівнянні за Парето. Зауважимо, що представлена методика дозволяє уникати перерозходу витрат на матеріали, оскільки, як видно з рис. 10, при одних й тих же витратах ресурс може відрізнятись у рази.

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень були проведені експлуатаційні випробування. Підбір раціональних товщин покриття виконували з врахуванням норм міжремонтних пробігів, тобто задавались пробігом локомотивів, до якого відновлені деталі повинні пройти, не перевищуючи допустиму нормовану межу зносу. Результати експлуатаційних випробувань відновлених деталей порівнювали з «новими», тобто виготовленими (або придбаними) і встановленими на одному локомотиві (рис. 11).

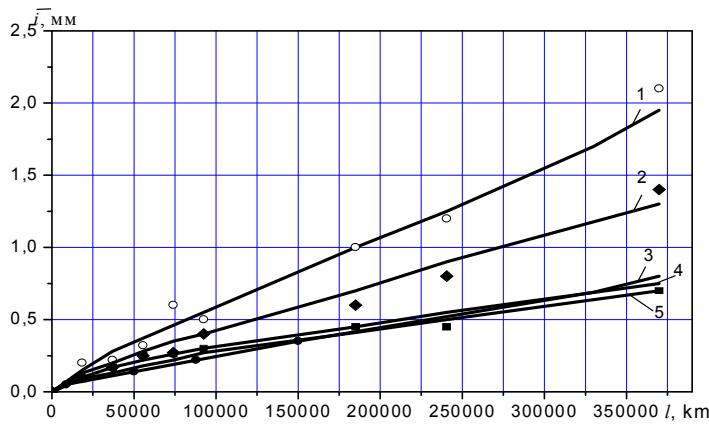


Рис. 11 – Залежність середнього значення величини зносу валиків від пробігу електровозів:

- 1 – без покриття (Ст45);
 2 – шарувате ГП:
 Св08Г2С+30ХГСА+65Г
 (плазмово-дугове);
 3 – шарувате ГП:
 Fe-B + Fe-Cr-B-Si + Fe-B (детонаційне); 4 – шарувате ГП:
 Fe-B + ПС12НВК + Fe-B (детонаційне);
 5 – шарувате ГП:
 Fe-B + Fe-Mo-Cr-Ni-C + Fe-Ni-B
 (детонаційне).

Апроксимуючі вирази залежностей середнього значення зносу $\bar{i}$ валиків ГВП від пробігу l локомотивів $i(l) = a + b \cdot 10^{-6} \cdot l$ мають вигляд відповідно:

$$\left. \begin{aligned} 1: i(l) &= 0,061 + 5,1 \cdot 10^{-6} \cdot l; \\ 2: i(l) &= 0,068 + 3,4 \cdot 10^{-6} \cdot l; \\ 3: i(l) &= 0,022 + 2,1 \cdot 10^{-6} \cdot l; \\ 4: i(l) &= 0,02 + 2,08 \cdot 10^{-6} \cdot l; \\ 5: i(l) &= 0,06 + 1,89 \cdot 10^{-6} \cdot l. \end{aligned} \right\}$$

З наведених результатів випробувань можна зробити такі висновки:

- експлуатаційні випробування підтвердили характер і встановлені кількісні закономірності прискорених випробувань на знос досліджених нанесених покриттів;

- із досліджуваних матеріалів найбільш висока зносостійкість належить ГП з аморфізованими шарами та ПС12НВК. Особливістю застосованих покриттів є їх відносно невеликий розкид зносу навколо середніх значень.

У шостому розділі розглянуто відновлення деталей рухомого складу шаруватими електролітичними покриттями. Запропонована методика багатокритеріального математичного моделювання процесів електролітичного нанесення покриттів. У загальному вигляді процес відновлення у будь-який момент часу можна характеризувати деяким набором показників $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, серед яких можуть бути показники як кількісні, так і якісні. Під критерієм будемо розуміти правило відбору варіантів. Тоді правило відбору за двома і більш показникам можна представити таким чином:

- нехай x – набір предикторних змінних, якому, наприклад, відповідає міцність зчеплення $F_1(x)$ і мікротвердість $F_2(x)$, а y – теж набір предикторних змінних, якому відповідає міцність зчеплення $F_1(y)$ і мікротвердість $F_2(y)$. Тоді говорити-мемо, що набір « y краще, ніж x », якщо має місце

$$\begin{pmatrix} F_1(x) \leq F_1(y) \\ F_2(x) \leq F_2(y) \end{pmatrix}.$$

Таким чином, наведене співвідношення необхідно розглядати як критерій.

У математичному плані приходимо до завдання, формальний запис якого є $\begin{pmatrix} F_1(x) \\ F_2(x) \end{pmatrix} \rightarrow \max$ за умови, що $x \in X$, де X – область зміни предикторних змінних

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Заради визначеності вкажемо, що розумітимемо під рішенням задачі векторної оптимізації.

Визначення 1. Значення предикторних змінних $x \in X$ називатимемо ефективним, якщо будь-яке відхилення від x приводить до зменшення $F_1(x)$ або $F_2(x)$ або обох відразу.

Визначення 2. Множину $X_* \subseteq X$ називатимемо рішенням задачі, якщо будь-яке $x_* \in X_*$ є ефективним і незрівняним з іншими x_* з X_* .

Враховуючи важливість введених понять, розглянемо модельний приклад, коли функції $F_1(x)$ і $F_2(x)$ мають наступний вигляд (рис. 12).

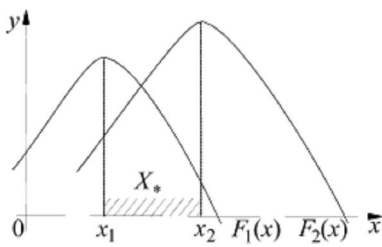


Рис. 12 – Графічне представлення модельного прикладу

Нехай x_1 таке значення $x \in [0, \infty]$, при якому $F_1(x)$ досягає максимального значення, а x_2 має аналогічний сенс для $F_2(x)$, тоді рішенням задачі є множина X_* , яка може бути використана для побудови раціонального технологічного процесу покриття.

Наступним важливим кроком є визначення впливу умов електролізу на структуру та механічні властивості електролітичних покриттів. На формування структури впливає багато чинників, серед яких можна виділити хімічні та електричні. До хімічних можна віднести: концентрацію, кислотність та температуру електроліту, поверхнево-активні речовини, перемішування, проточність електроліту. До електричних відносять густину струму, середні катодний та анодний струми, співвідношення значень катодного та анодного струмів, наявність паузи, максимальні значення, шпаруватість та частоту струму.

Обравши тип і склад електроліту, керування процесом здійснювали, змінюючи електричні параметри. Для інтенсифікації процесу та підвищення якості покриттів були застосовані струми різної форми. З метою реалізації відповідних досліджень нами було розроблено та реалізовано джерело живлення та програма керування джерелом. Оператор (технолог) на ЕОМ задає будь-яку форму струму та необхідні електричні параметри процесу, а комп'ютер передає керуючі сигнали на джерело живлення, який повторює задану форму і відтворює задані оператором параметри процесу. Крім того, розроблене джерело дозволяє на протязі одного процесу змінювати режими електролізу до 10 разів. Розроблене джерело живлення дозволяє регулювати електричні параметри за максимальним значенням J_m^{np} і тривалістю T_i^{np} прямого імпульсу, за максимальним значенням J_m^{zb} і тривалістю T_i^{zb} зворотного імпульсу, за наявністю (відсутністю) та тривалістю паузи T_n . Розробку технологій нанесення електролітичних покриттів та відповідне оснащення проводили у прив'язці до ремонтних підприємств залізниці. При певних умовах осадження можна отримати покриття з товщиною шарів навіть до 0,1 мкм. При плануванні експериментів програмували джерело живлення таким чином, щоб відбувалося чергування шарів з різними розмірами блоків мозаїки (від $D \approx 200 \dots 250$ Å до 2000 Å) та певними товщинами шарів.

Як показали експерименти, *межу міцності* σ_v електролітичного шаруватого заліза вдалося підвищити майже до 53 МПа тільки за рахунок застосування нестационарних режимів. Хоча збільшення σ_v і незначне, але важливим є свідчення можливості варіювання та поєднання підчас протилежних властивостей матеріалу, наприклад, таких як пружність та пластичність. Очевидно, збільшення міцності вдалось досягти за рахунок чергування більш міцних шарів (шари з $D \approx 300 \dots 350 \text{ \AA}$), які мають більш мілкокристалічну структуру з шарами, що мають більшу пластичність, при цьому шари мали більш крупнокристалічну структуру – $800 \dots 1500 \text{ \AA}$ і більше.

Міцність зчеплення $\sigma_{зч}$ покриття з основним металом є найважливішою властивістю при відновленні зношених деталей. Забезпечити ідеально чисту поверхню деталей в умовах ремонтного виробництва фактично неможливо, а технологічні операції з відомих процесів досі викликають наукові дискусії. За результатами проведених експериментів можна зробити припущення, що шаруватість сама по собі на $\sigma_{зч}$ має незначний вплив при відриві покриття від основи по нормалі, але суттєво при цьому впливає розмір блоків мозаїки першого, адгезійного шару. На основі отриманих експериментальних даних отримана регресійна залежність: $\sigma_{зч} = -85,8 + 0,92D - 0,69 \cdot 10^{-3} D^2 + 0,14 \cdot 10^{-6} D^3$, МПа.

Наведена регресійна залежність адекватна для певних меж D ($100 \dots 1500 \text{ \AA}$); також зауважимо, що від'ємний коефіцієнт у регресійній залежності не має фізичного сенсу, а являє собою лише вільний член рівняння. У роботі наведені пояснення щодо встановленої залежності $\sigma_{зч}$.

Тонка структура електролітичного заліза суттєво впливає на *мікротвердість* H_μ , яка у свою чергу, знаходиться у тісному зв'язку з механічними властивостями електролітичних покриттів. Отриману залежність H_μ від значень D умовно можна розділити на три ділянки. Ділянка I має лінійний характер з перегином в точці, що відповідає розміру блоків мозаїки приблизно $350 \dots 300 \text{ \AA}$. На ділянці II відбуваються ті ж процеси, але з меншою інтенсивністю. Другу точку перегину $\approx 100 \text{ \AA}$ умовно можна назвати критичною. За цією точкою починається ділянка III, на якій мікротвердість зменшується. Науковий та практичний інтерес представляють ділянки I та II, особливо I, оскільки на цій ділянці вплив субмікродріщин незначний. Математична обробка показала, що залежність H_μ від D можна описати рівняннями

$$H_\mu^I = 6733,3 - 0,75D \text{ — для ділянки I;}$$

$$H_\mu^{II} = 6942 - 2,44D \text{ — для ділянки II.}$$

Зносостійкість є визначальною експлуатаційною властивістю покриттів. В роботі проведено детальний аналіз зв'язку зносостійкості шаруватих залізних покриттів із тонкою структурою шарів. Важливим результатом досліджень стало те, що застосування шаруватої будови покриття при певних геометричних співвідношеннях самих шарів та їх мікроструктур (чергування крупнокристалічних з мілкокристалічними) дозволяє підвищити зносостійкість всього покриття в цілому (рис. 13). Зробимо пояснення стосовно рис. 13. Шаруваті покриття отримані програмно. Співвідношення товщин шарів 1 та 2 $h_1 / h_2 : 2 - h_1 / h_2 = 3/1 ; 3$

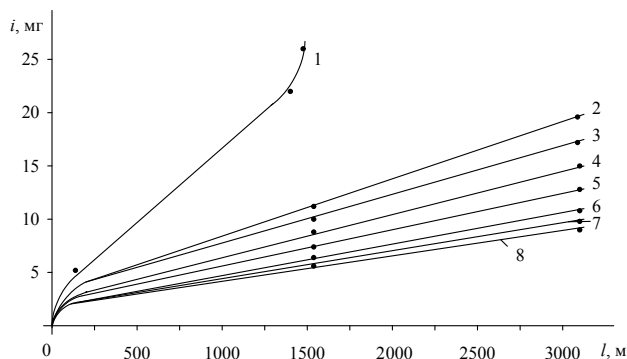


Рис. 13 – Залежність зносу електроосадженого заліза при сухому терті від пробігу при питомому тиску 2 МПа. Контроліто – сталь 45 загартована с.в.ч.: 1 – сталь 45 загартована с.в.ч.; 2 – шарувате покриття

– $h_1/h_2 = 2/1$; 4 – $h_1/h_2 = 3/1$ та $h_1/h_2 = 1/1$; 5 – $h_1/h_2 = 1/1$; 6 – $h_1/h_2 = 2/1$; 7 – $h_1/h_2 = 3/1$ та режим 3 з $h_1/h_2 = 1/1$; 8 – режим 2, $h_1/h_2 = 2/1$.

Інші співвідношення товщин та режимів на рис. 13 не наведені, оскільки мають гірші результати й інтересу не представляють.

В дисертаційній роботі запропоновано пояснення механізму зношуван-

ня та підвищення зносостійкості шаруватого покриття. Також у роботі показано гальмування розвитку мікротріщин багатшарової структури у в'язких пластичних шарах, що добре видно на зразку підданому руйнуванню (рис. 14).

Таким чином шарувата структура дозволяє підвищити зносостійкість у порівнянні з моношарами, однак отримання переваг шаруватої будови покриття можливе лише при певних співвідношеннях товщини та властивостей окремих шарів. Теоретично товщина шарів має прагнути до нуля, а фактично – бути мінімально можливою. На підставі експериментів (рис. 13) можна зробити висновок, що раціональне співвідношення товщин шарів залежить від співвідношення розмірів блоків мозаїки.

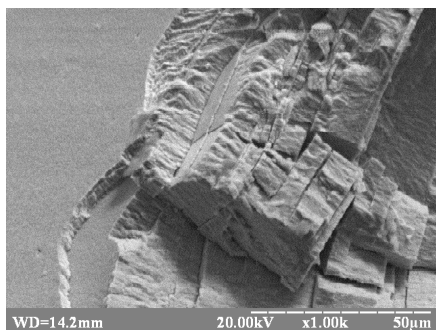


Рис. 14 – Електролітичне шарувате покриття (режим 2) після примусового руйнування

Властивості шаруватих електролітичних сплавів на основі заліза, отриманих програмним електролізом. Для нанесення електролітичних сплавів використовували, як і для інших електролітичних процесів, розроблену установку.

Сплав залізо-марганець Fe–Mn. Неодмінною перевагою при використанні марганцю у якості легуючого елементу є його дешевизна та наявність запасів в Україні. Мікротвердість сплаву Fe–Mn у середньому перевищувала на 1500 МПа мікротвердість електролітичного заліза, отриманого при тих же умовах оса-

дження. Враховуючи отримані результати, нами запропоновано для практичних цілей при відновленні деталей рухомого складу даним сплавом перші шари (адгезійні) осаджувати при вмісті марганцю до 1,5 % з поетапним його збільшенням до 4,5...5 %. Регулювання вмісту легуючого компоненту Mn здійснювали програмно за рахунок зміни максимальних значень прямого та зворотного струмів та їх тривалості. У даному процесі паузу не використовували.

Сплав залізо-фосфор $Fe-P$ доволі широко відомий, тому дослідження проводилися нами в напрямку удосконалення технології нанесення покриттів з використанням даного сплаву. Нам не вдалося отримати працездатні залізофосфорні покриття без термічної обробки через їх високу крихкість, тому, на нашу думку, одним із недоліків використання розглядуваного сплаву є необхідність додаткових витрат на термічну обробку покриттів. Осаджування проводили з використанням двох типів електролітів – хлористого та сульфатного. За нашими експериментальними даними H_{μ} при стаціонарних умовах не перевищувала 5600 МПа, а після утворення фосфідів при високотемпературному відпалі вона досягла значень близько 7200 МПа, при тих же умовах, використовуючи програмний електроліз вдавалося за рахунок зміни електричних режимів отримувати H_{μ} покриття 8300 МПа, а після відпалу – 10200 МПа. Утворені фосфіди після відпалу рівномірно розподілені по площині шарів покриття. Залежність зносу покриття зразків від шляху тертя показано на рис. 15. Високу зносостійкість сплаву $Fe-P$ можна пояснити декількома причинами: по-перше, утворенням фосфідів після відпалу зразків, по-друге, температурною стабільністю та збереженням або, навіть, зростанням мікротвердості при терті; по-третє, стабільністю у відтворюванні окисної плівки на поверхні тертя. Як показали експерименти, сплав $Fe-P$ здатний витримувати без схоплювання питоме навантаження до 1,8 МПа навіть при контактуванні з контртілом із загартованої сталі. Також зауважимо відмінність зв'язку мікротвердості електролітичного заліза, у якого оптимальна H_{μ} за критерієм зносу вважається у межах 4500...5500 МПа, для сплаву $Fe-P$ цей оптимум зміщується в бік збільшення мікротвердості та має менш виражений характер (рис. 16).

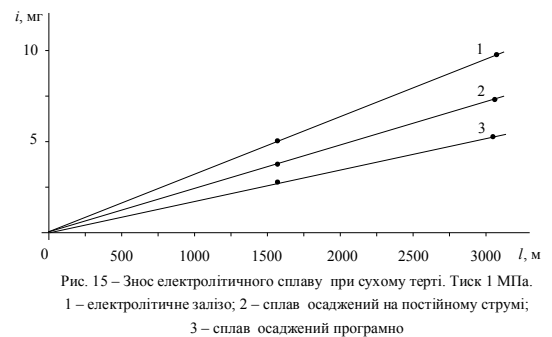


Рис. 15 – Знос електролітичного сплаву при сухому терті. Тиск 1 МПа.
1 – електролітичне залізо; 2 – сплав осаджений на постійному струмі;
3 – сплав осаджений програмно

Як витікає з рис. 16, найменший знос розглядуваного сплаву знаходиться в межах 8500...9500 МПа при граничному терті та 7000...8500 МПа при сухому. Зносостійкість отриманого програмно сплаву $Fe-P$ при-близно у 2,8 разів вище при сухому терті та у 2,3 рази при граничному у порівнянні зі сталлю 45; 1,18 рази у порівнянні із аналогічними покриттями, отриманими у стаціонарних умовах; ~ у 2 рази більше у порівнянні з електролітичним залізом.

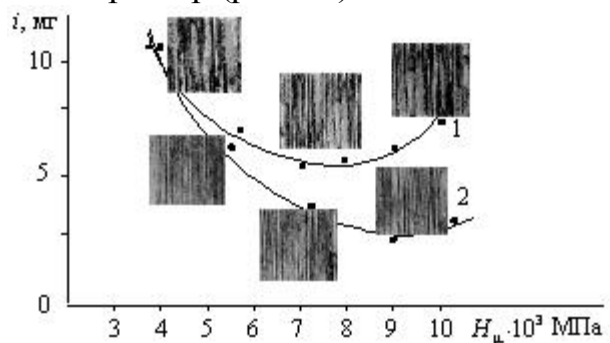


Рис. 16 – Зв'язок між мікротвердістю та зносом електролітичного сплаву $Fe-P$:
1 – при сухому терті; 2 – при граничному терті

Окрім наведених вище нами також було проведено теоретичні та експериментальні дослідження з отримання зносостійких програмних електролітичних покриттів із сплавів $Fe-Ni$ та $Fe-Ni-P$.

Міцність з'єднання деталей з гарантованим натягом, відновлених шаруватими покриттями. Серед існуючих з'єднань деталей широке застосування знайшло з'єднання з гарантованим натягом. Цей вид з'єднання використовують у техніці

завдяки простоті конструкції та високій експлуатаційній надійності, що дозволяє вузлам працювати у важких динамічних умовах. На рухомому складі залізничні такі з'єднання використовують у системі «шийка осі колісної пари – внутрішнє кільце підшипника», у тяговому редукторі для посадки шестерні та зубчастого колеса, для посадки бандажів на локомотивах, посадки зубчастої шестерні на вали електричних машин. Підвищення міцності пресових з'єднань з програмним шаруватим цинковим гальванічним покриттям у порівнянні з цинком, осадженим на постійному струмі можна пояснити більш дрібнозернистою структурою окремих шарів (розміри зерен цинку складають 0,7...0,8 мкм проти 15...16 мкм на постійному струмі), більшою щільністю (розміри блоків мозаїки дорівнюють 40...50 нм проти 500 нм на постійному струмі). Результатом цього є збільшення мікротвердості осаджених шарів до $H_{\mu} = 1550...1600$ МПа (на постійному струмі $H_{\mu} = 700...750$ МПа). Чергування м'яких та більш твердих шарів дозволяють розподіляти внутрішні напруження, що виникають у покритті між шарами, отримувати високу міцність зчеплення, більший коефіцієнт тертя, у 1,5...2,1 рази підвищити силу розпресування, а також значно покращити корозійну стійкість спряжених деталей пресових з'єднань.

Нанесення комбінованих шаруватих електролітичних відновлювальних покриттів. В деяких випадках при ремонті рухомого складу можливий варіант відновлення деталей різними електролітичними металами. Наносили метали: заліза, нікелю, хрому, міді у різних комбінаціях. У роботі вперше встановлено можливість суттєвого поліпшення триботехнічних параметрів і мікротвердості хром-вуглецевих гальваноосадів при використанні імпульсного електролізу без застосування енергоємної процедури їх термообробки. Останнє є важливим для ремонтного виробництва рухомого складу, оскільки кожна додаткова операція позначається на вартості ремонту. Також можна додати, що запропоновані у роботі технології відновлення можна комбінувати між собою, наприклад, ГП покривати електролітичними покриттями, які будуть виконувати різні функції: покращувати припрацювання, захищати від корозії, створювати опір фретинг-корозії, підвищувати зносостійкість та ін.

У сьомому розділі розглянуто оцінку надійності деталей відновлених шаруватими покриттями, технології нанесення шаруватих покриттів та техніко-економічна ефективність розроблених технологій відновлення.

Як правило, для поступових відмов, в тому числі зносних, застосовують закони: нормальний, логарифмічно-нормальний, Вейбулла, гамма-розподіл і Релєя. Розглянемо застосування методики визначення показників надійності покриттів на прикладі валиків ГВП електровозу ЧС4. Згідно нормативної документації допустимий знос валиків становить $\leq 2,5$ мм, також лімітується сумарний зазор між валиком і втулкою. Тобто, якщо валик зношується на 2,5 мм і більше, його необхідно вилучити з експлуатації, тому цю величину зносу приймаємо за обмеження. Нормативний початковий зазор між валиком і втулкою становить 0,55 мм, тобто можна умовно прийняти, що $\bar{i}_{\text{нов}} = 0,55$ мм – це початковий умовний знос валика. Розглянемо формування закону розподілу напрацювання до відмови, зробивши припущення, що закон розподілу зносу – нормальний. Тоді

для валика без покриття із середнього розрахунку пробігу локомотивів від КР до ПРЗ $l = 370000$ км випадкову зміну величини зносу знайдемо, як

$$i(l) = \bar{i}(l) + u \cdot l = 0,55 + 0,061 + 5,1 \cdot 10^{-6} \cdot 370000 = 2,5 \text{ мм};$$

а з урахуванням початкового розкиду

$$i_{\Pi}^B(l) = \bar{i}_{\text{поч}} \cdot (l) + 3\sigma_{i_{\text{поч}}} = 0,55 + 3 \cdot 0,035 = 0,655 \text{ мм};$$

$$i_{\Pi}^H(l) = \bar{i}_{\text{поч}} \cdot (l) - 3\sigma_{i_{\text{поч}}} = 0,55 - 3 \cdot 0,033 = 0,445 \text{ мм},$$

де $\sigma_{i_{\text{поч}}}$ – початковий розкид вихідного креслярського розміру валиків.

З врахуванням кінцевого розкиду

$$i_K^B(l) = \bar{i} \cdot (l) + 3\sigma_{i_{\text{поч}}} = 0,55 + 3 \cdot 0,316 = 1,5 \text{ мм};$$

$$|i_K^H(l)| = \bar{i} \cdot (l) - 3\sigma_{i_{\text{поч}}} = 0,55 - 3 \cdot 0,316 = 0,4 \text{ мм}.$$

Знайдемо середнє напрацювання до відмови

$$\bar{L} = \frac{i_{\text{доп}} - i_{\text{поч}}}{u} = \frac{2,5 - 0,55}{5,1 \cdot 10^{-6}} = 382\,353 \text{ км}.$$

Пробіг, при якому може бути досягнута встановлена межа за зносом (у даному випадку 2,5 мм) (рис. 17):

$$L_H = \frac{i_{\text{доп}} - i_K^B}{u} = \frac{2,5 - 1,5}{5,1 \cdot 10^{-6}} = 196\,078 \text{ км}.$$

А середнє квадратичне відхилення пробігу до відмови

$$\sigma_L = \frac{\bar{L} - L_H}{3} = \frac{382\,353 - 196\,078}{3} = 62\,092 \text{ км}.$$

Закон розподілу напрацювання до відмови валиків без покриття буде мати вигляд

$$f(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 62\,092} e^{\left[\frac{(l - 0,382 \cdot 10^6)^2}{2 \cdot 62092^2} \right]}.$$

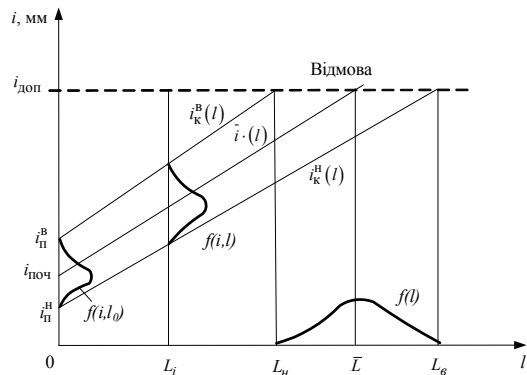


Рис. 17 – Схема формування поступової відмови

Тепер розглянемо більш складний випадок, в якому будемо враховувати знос втулки. Розглянемо найгірший варіант, коли допускається зазор між вказаними елементами 3 і більше мм. Розрахунки виконуємо за зазначеною вище процедурою. Тоді середнє напрацювання до відмови $\bar{L}$ складе 379183 км. Зробимо пояснення: хоча допустимий знос (в даному випадку зазор) контактної пари «валик–втулка» $i_{\text{доп}}$ більший за попередній випадок на 0,5 мм, однак у даному випадку враховується знос втулки. Пробіг, при якому може бути досягнута встановлена межа за зносом складе 192178 км.

За зазначеною методикою розраховуємо розподіл напрацювання до відмови валиків, відновлених шаруватими покриттями. Середнє напрацювання до відмови (усереднене для ГП з аморфізованими шарами) складає $1,225 \cdot 10^6$ км. Мінімально можливий до появи відмови пробіг $1,04 \cdot 10^6$ км. Середнє квадратичне відхилення пробігу до відмови 61667 км. Закон розподілу напрацювання до відмови валиків з шаруватими покриттями буде мати вигляд

$$f(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 61\,667} e^{\left[\frac{(l - 1,225 \cdot 10^6)^2}{2 \cdot 61667^2} \right]}.$$

Проте, як показали результати аналізу отримуваних даних, можуть виникати

ситуації, коли дисперсія досліджуваної випадкової величини доволі висока. Крім того, в наслідок суб'єктивності прийняття того або іншого закону розподілу випадкової величини за зовнішніми ознаками можуть виникати суттєві похибки у розрахунках показників надійності. Тоді застосування наведеної вище методики становиться сумнівним. Тому виникає необхідність застосування або розробки іншої методики, яка б виключала вказані недоліки.

В загальному сенсі припустимо, що зношену деталь було відновлено одним із розглядуваних способів (наплавленням, газотермічним напиленням або електrolітичними методами). Нехай відновлювальне покриття умовно містить три шари товщиною h_1, h_2, h_3 . Інтенсивність (або швидкість) зношування цих шарів буде відповідно ξ_1, ξ_2 та ξ_3 . Тоді напрацювання до відмови за зносом відновлювальних шарів складе $T = \sum_{i=1}^n h_i / \xi_i; n = 3$.

Вважаємо, що інтенсивність (швидкість) зношування є випадковими величинами і знаходяться в межах $\xi_i \in [a_i, b_i], i = \overline{1,3}$; встановлені із експериментальних даних. Тоді імовірність події $T < t$, де t — дійсне число із відрізка $[t_{\min}, t_{\max}]$, а сам відрізок визначається співвідношеннями

$$t_{\min} = h_1 / b_1 + h_2 / b_2 + h_3 / b_3; \quad t_{\max} = h_1 / a_1 + h_2 / a_2 + h_3 / a_3.$$

Якщо випадкові величини ξ_1, ξ_2, ξ_3 незалежні й мають густину розподілу ймовірностей часу (пробігу) до відмови $f_1(t_1), f_2(t_2), f_3(t_3)$, то: $Q(t|h_1, h_2, h_3) = F\{h_1/\xi_1 + h_2/\xi_2 + h_3/\xi_3 < t\}$ буде дорівнювати

$$Q(t|h_1, h_2, h_3) = \iiint_G f_1(t_1) f_2(t_2) f_3(t_3) dt_1 dt_2 dt_3,$$

де область інтегрування G визначається співвідношеннями

$$G = \{(t_1, t_2, t_3) : a_i \leq t_i \leq b_i, i = \overline{1,3}, h_1/t_1 + h_2/t_2 + h_3/t_3 \leq t\}.$$

Ймовірність безвідмовної роботи складе $P(t|h_1, h_2, h_3) = 1 - Q(t|h_1, h_2, h_3)$.

У цьому представленні t_i деяка функція t_1, t_2 та t_3 ; t_2 залежить від t, t_3 , причому t_1, t_2 повинні задовольняти співвідношенням $a_1 \leq t_1 \leq b_1; a_2 \leq t_2 \leq b_2$. У площині t_1, t_2 даним співвідношенням відповідає таке геометричне представлення (рис. 18).

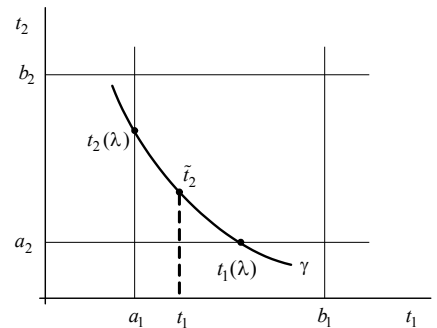


Рис. 18 – Геометричне представлення області інтегрування по t_1 та t_2

Виконуючи наведену вище методику й опускаючи заради стислості проміжні розрахунки, знаходимо імовірність безвідмовної роботи з врахуванням зносу.

На підставі останнього виразу будуюмо залежність імовірності безвідмовної роботи відновленої деталі з врахуванням зносу від пробігу (терміну експлуатації) (рис. 19).

$$P = 1 - \int_{\max\left(0.2\frac{1}{t}, 0.007\right)}^{\max\left(0.2\frac{1}{t}, 0.011\right)} \int_{\max\left(0.0011, \frac{1}{t-0.2/t_3}\right)}^{\max\left(0.002, \frac{1}{t-0.2/t_3}\right)} 0.69 \cdot 10^8 \max\left(0.014, 0.3 \frac{1}{t-1/t_2-0.2/t_3}\right) -$$

$$-0.69 \cdot 10^8 \max \left(0.01, 0.3 \frac{1}{t - 1/t_2 - 0.2/t_3} \right) dt_2 dt_3.$$

Таким чином, застосована методика дозволяє визначати імовірність безвідмовної роботи відновленої шаруватим покриттям деталі. Визначення надійності роботи відновленої деталі проведено з врахуванням зносу матеріалу шарів, як випадкової величини.

Технологія відновлення деталей рухомого складу наплавленням. Запропонований матеріал робочих шарів – дріт ПП-Нп-Г13Х13Н2МФ, розроблений фахівцями ІЕЗ ім. Є.Б. Патона. Технологія виготовлення, використання, а також постачання і зберігання, прописані в Технічних умовах України ТУУ 28.7.05416923.066-

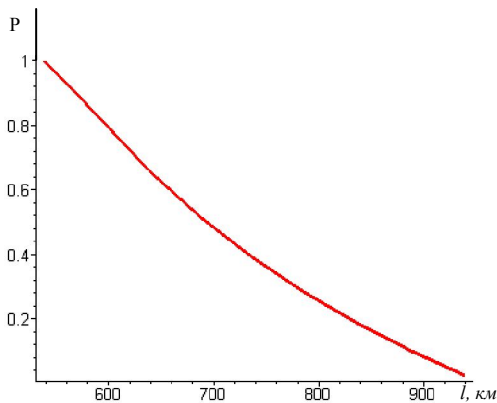


Рис. 19 – Залежність імовірності безвідмовної роботи відновленої деталі з врахуванням зносу від пробігу (терміну експлуатації)

2002. Рекомендовані діаметри вказаного дроту – 2,2...2,8 мм. Перші шари запропоновано наплавляти дротом Св-08Г2С. Кількість шарів, що наплавляються залежить від величини зносу і глибини знятого шару в результаті попередньої механічної обробки, а також з урахуванням отримання припуску (1,5...2 мм) під механічну обробку. В роботі наведені режими та схема наплавлення автозчепу та п'ятникового вузла.

Технологія відновлення деталей рухомого складу газотермічним напиленням. Використання того або іншого способу відновлення

деталей шаруватими газотермічними покриттями визначається в кожному конкретному випадку залежно від експлуатаційних вимог, їх складності, вимог до надійності та ресурсу, економічної ефективності з урахуванням необхідного обладнання, напилюваних матеріалів, газів, які використовуються і т.п.

До технологічного процесу газотермічного напилення пред'являють прийняті вимоги, а саме: стабільність встановлених значень параметрів, плазмовий струмінь повинен бути стійким без пульсувань, транспортування дроту чи порошку повинно відбуватись рівномірно, без відхилень від осі плазмового струменя. Для запобігання надмірного нагріву поверхні виробу в процесі нанесення відновлюваних шарів їх можна охолоджувати стиснутим повітрям, очищеним від вологи та мастила. В процесі нанесення відновлюваних шарів і після його закінчення контролюється стан напиленої поверхні. Повинен бути матовий колір, відсутність включень, сколів, тріщин, відшарувань, місць перегріву та рівномірний шар покриття. Технологічні параметри установок та режими напилення представлені у роботі.

Технологія відновлення деталей рухомого складу електролітичними методами. Як зазначалося, для нанесення електролітичних покриттів розроблена мобільна установка, яка дозволяє проведення стаціонарного, не стаціонарного, ванного та позаванного електролізу. Загальна схема технологічного процесу відновлення електролітичними методами містить такі операції: попереднє підготування деталей; їх електрохімічне очищення; процес нанесення електролітичних покриттів (залізнєння, цинкування, хромування, тощо) і фінішна обробка. У роботі запропоновано варіації технологічних процесів залізнєння, які відрізняються операція-

ми підготовки поверхні деталі, а також наведені особливості технологічних процесів нанесення шаруватих електролітичних покриттів.

Техніко-економічне обґрунтування відновлення деталей рухомого складу шаруватими покриттями. У даному підрозділі представлено теоретичне визначення раціонального співвідношення «ресурс – вартість» при відновленні деталей рухомого складу. Під раціональністю режимів нанесення відновлювальних покриттів будемо розуміти такі режими, при яких вартість відновлення буде мінімально можливою, а ресурс максимально можливим. Розглянемо поставлене завдання у прив'язці до циліндричних деталей рухомого складу. Нехай вартість відновлення на товщину dr дорівнює $z(r, u)$, де r – радіус циліндра, а u – вектор, що характеризує режим нанесення покриття (відновлення). Тоді сумарні витрати на відновлення циліндра від розміру r_0 до $r_0 + H$ буде наступною $F_1 = \int_{r_0}^{r_0+H} z(r, u) \cdot 2\pi r dr$, а ресурс або строк експлуатації складе $\tilde{F}_2 = \int_{r_0}^{r_0+H} \frac{dr}{\xi(r)}$, де $\xi(r)$ – швидкість зносу товщини dr , є випадковою величиною з густиною розподілу імовірностей $f(\vartheta, r)$.

Математичне очікування ресурсу відновленої деталі буде дорівнювати $F_2 = M[\tilde{F}_2]$, де M – операція математичного очікування, а з врахуванням $\tilde{F}_2$ маємо $F_2 = \int_a^b \int_{r_0}^{r_0+H} \frac{dr}{\vartheta} f(\vartheta, r) d\vartheta$, де відрізок $[a, b]$ – характеризує розкид швидкості зносу.

Таким чином приходимо до задачі векторної оптимізації, формальний запис якої має вигляд

$$\begin{pmatrix} F_1(u) \\ -F_2(u) \end{pmatrix} \rightarrow \min,$$

при умові, що $u \in U$, де U – область допустимих режимів відновлення.

В математичному плані F_1 та F_2 представляють собою функціонали, які запишемо у вигляді

$$F_1 = \int_{r_0}^{r_0+H} f_1(r, u) dr;$$

$$F_2 = \int_{r_0}^{r_0+H} f_2(r, u) dr,$$

$$\text{де } f_1(r, u) = 2\pi r \cdot z(r, u); \quad f_2(r, u) = \int_{a(r, u)}^{b(r, u)} \frac{f(\vartheta, r)}{\vartheta} d\vartheta.$$

На підставі основної теореми варіаційного обчислення приходимо до співвідношення

$$\frac{\partial f_1(r, u)}{\partial u} - t \frac{\partial f_2(r, u)}{\partial u} = 0.$$

Із даного рівняння знаходимо u , як функцію r та t , тобто $u = u(r, t)$.

Підставив u у F_1 та F_2 приходимо до функцій тільки параметра t :

$$F_1(t) = \int_{r_0}^{r_0+H} f_1(r, u(r, t)) dr;$$

$$F_2(t) = \int_{r_0}^{r_0+H} f_2(r, u(r, t)) dr.$$

Перебираючи $t \geq 0$ будемо незрівняні варіанти та знаходимо взаємозв'язок між витратами F_1 та середнім ресурсом F_2 .

Техніко-економічна ефективність застосування технологій відновлення деталей рухомого складу шаруватими покриттями. Середня програма ремонту локомотиворемонтного заводу складає 68 електровозів на рік, з яких односекційних 18 шт., двосекційних – 50 шт. Тоді кількість автозчепів становить 236 шт. Розрахунок економічної ефективності для умов локомотиворемонтного заводу у порівнянні з новими складає 6897 тис. грн/рік.; а у порівнянні з ремонтуємими за існуючими технологіями складає приблизно 281,5 тис. грн/рік. Аналогічні розрахунки економічного ефекту по упорним плитам становлять 237,2 тис. грн/рік у порівнянні з новими та 46,1 тис. грн/рік у порівнянні з ремонтуємими на заводі.

Результати розрахунку собівартості плазмово-дугового напилення площі 1 см^2 товщиною 1 мм на установці УН-126 дротом із сталі 65Г, враховуючи операції попередньої токарної обточка та шліфування після напилення, складає приблизно $C'_m = 0,25 \text{ грн/см}^2$. Опускаючи проміжні розрахунки вкажемо, що середня вартість виготовлення валиків складає 43,7 грн/од. Виходячи із програми ремонту електровозів знаходимо річний економічний ефект, який складає 546,7 тис. грн при застосуванні плазмоводугового методу та 361,9 тис. грн при застосуванні детонаційного методу. У роботі показані результати розрахунку економічної ефективності від використання газотермічного напилення для відновлення осей колісних пар електровозів для забезпечення натягу у парі з'єднання «шийка осі колісної пари – внутрішнє кільце підшипника». Враховуючи програму ремонту електровозів, річний економічний ефект від впровадження технології відновлення шийок осей колісних пар електровозів ЧС-2, ЧС-7 плазмово-дуговим методом становить 525,5 тис. грн; детонаційним методом – 340,2 тис. грн. Те ж для вантажних вагонів – 940 тис. грн по відношенню до нових та 440 тис. грн (по відношенню до осей II-ої категорії, тобто тих осей, у яких термін служби знаходиться в межах від 5 до 15 років).

Розрахунки собівартості шаруватого електролітичного відновлення деталей з прив'язкою до 1 дм^2 показали, що собівартість відновлення залізненням C_e складає – 5,76 грн/дм². При відновленні циліндричних деталей (валиків) шаруватим електролітичним залізом за розробленою технологією річний економічний ефект складає 1072,9 тис. грн для умов заводу та 863 тис. для умов депо. Отримані значення E розраховані із умов номінального завантаження ванн. Використання сплавів на основі заліза (розділ 6) дає економічний ефект 854 тис. грн та 534,3 тис. грн для умов заводу та депо відповідно. Зменшення E при використанні електролітичних сплавів на основі заліза пов'язане зі збільшенням собівартості нанесення покриттів, що у свою чергу, пов'язано з наявністю додаткових компонентів у розчині електроліту, необхідністю обов'язкового проведення термообробки після

осадження покриттів, ускладненням самого процесу, контролю та корегування електроліту та ін. Для забезпечення натягу у парі з'єднання «шийка осі колісної пари – внутрішнє кільце підшипника» електролітичними методами запропоновано застосовувати цинкування. Вартість осадження цинку складає 4,2 грн/дм². Нагадаємо, що у даному випадку відновлення натягу забезпечується шляхом електролітичного нанесення цинкового покриття на внутрішню поверхню внутрішнього кільця підшипника. Тоді річний економічний ефект від впровадження вказаної технології при ремонті електровозів ЧС-2, ЧС-7 складе 536,4 тис. грн. Застосування даної технології для осей колісних пар вагонів забезпечує економічний ефект на рівні 1349 тис. грн.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача підвищення рівня надійності, продовження термінів експлуатації та здешевлення ремонту діючих електровозів залізниць України. Виконані в дисертації дослідження дозволяють зробити такі висновки.

1. Проаналізовані умови експлуатації деталей механічної частини рухомого складу та встановлені кількісно-статистичні характеристики зносу: середній знос хвостовика автозчепу становить 7,47 мм, упорної плити – 7,64 мм, середнє стандартне відхилення – 3,5 мм і 3,69 мм відповідно; знос валиків гальмівної важільної передачі (ГВП) локомотивів становить 1,93 мм на діаметр, вантажних вагонів – 1,67 мм; максимальні значення зносу валиків ГВП досягають 3 мм, стандартне відхилення – 0,38 мм, середній знос валиків ресорного підвішування – 2,12 мм, стандартне відхилення – 0,35 мм. Статистичні дослідження зносу п'ятникового вузла вантажних вагонів, що поступили на заводський ремонт показали, що середній знос п'ятника складає 9,8 мм на діаметр та 7,6 мм по опорній поверхні; підп'ятник має середній знос 8,1 мм по опорній поверхні та 16,3 мм на діаметр по бурту.

На основі аналізу умов експлуатації, ступеню зносу, кількості елементів та вартісних показників визначені типові за взаємодією групи деталей, для яких рекомендовані найбільш доцільні при ремонті технології відновлення в умовах структурних підрозділів залізниці.

2. Для обраних деталей встановлені закономірності змінювання параметрів стану в процесі експлуатації. Виявлено, що на корпус автозчепу та п'ятниковий вузол діє складний механізм зношування: зминання поверхневих шарів деталей в результаті дії статичних і динамічних навантажень в процесі експлуатації, механічне зношування при терті, яке супроводжується ударами різної інтенсивності, абразивне зношування при попаданні в вузол тертя абразивних частинок різної твердості, втомне руйнування поверхонь внаслідок циклічної контактної взаємодії. Крім того, у п'ятниковому вузлі додається корозійно-механічний вид зношування.

На валики гальмівної важільної передачі та ресорного підвішування діє механічне зношування, переважно втомлене. До вказаного механізму з часом додається корозійно-механічний у корозійно-окислювальній формі. В результаті зношування збільшується зазор між валиком та втулкою, що супроводжується додатковими динамічними навантаженнями, погіршенням режимів змащування, потрап-

лянням абразивних часток та інтенсифікацією корозійно-окислювальної форми зношування.

3. Для шаруватих покриттів сформульовані основні принципи їх побудови по загальній товщині всього покриття. Також шарувате покриття може бути представлено у вигляді реологічної моделі, що дозволяє застосовувати реологічні підходи при дослідженні зносу контактуючих тіл та аналізу реологічних характеристик шорстких поверхонь взаємодіючих тіл (шарів) відновлених деталей.

4. Встановлено зв'язки між параметрами технологічних процесів відновлення деталей рухомого складу залізниць, структурою та властивостями шаруватих покриттів. Показано, що регулюючи параметри технологічних процесів нанесення покриттів, можна отримувати шари з наперед заданими (очікуваними) властивостями. В роботі показано, що для отримання композиційного шаруватого покриття методами наплавлення та газотермічного напилення найбільш доцільно використовувати різні матеріали, комбінуючи їх в залежності від потреб ремонтного виробництва. Отримання шаруватих покриттів електролітичними методами найбільш доцільно шляхом зміни електричних параметрів джерела живлення і в меншій мірі, комбінуючи шари, отримані в різних електролітах.

5. Для тривимірної взаємодії отримано диференціальне рівняння поверхонь зносу контактуючої пари. Запропоновані математичні моделі зносу контактуючих тіл, які мають шаруваті покриття. Для контактних пар типу «вал-вкладиш» отримані диференційні рівняння зносу кожного покриття та отримано умови визначення строку служби пари.

Розроблена математична модель із визначення раціональних параметрів відновлювального шаруватого покриття деталей рухомого складу при ремонті, яка враховує вартісні показники процесу, що дозволяє підприємству обирати раціональні режими та технологію відновлення зношених деталей. Задача визначення терміну служби представлена у безрозмірній формі та отримані критерії подібності. Показана залежність терміну служби шаруватого покриття від дії змінного навантаження. Запропонована математична модель дозволяє визначати вплив варіації товщини шарів та їх механічних властивостей на термін служби.

6. З огляду на умови експлуатації та матеріали крупногабаритних деталей для відновлення корпусу автозчепу та п'ятникового вузла запропоновано використовувати шарувате наплавлення. Перші шари слід наплавляти дротом Св08Г2С, робочі шари – дротом ПП-Нп-Г13Х13Н2МФ. Останній забезпечує отримання наплавленого металу зі структурою метастабільного аустеніту, який самозміцнюється в процесі експлуатації. Згідно проведених експериментів зносостійкість зразків наплавленої композиції в 3...5 разів вище, ніж зразків з базового металу. Дослідження мікроструктури і заміри мікротвердості поверхневого шару зразків наплавленого металу Г13Х13Н2МФ до і після випробувань на зношування при терті металу по металу показали, що в процесі зношування відбувається зміцнення поверхневого шару за рахунок $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення, тобто деяка кількість метастабільного аустеніту перетворюється в мартенсит. Товщина зміцненого шару досягає 30 мкм, а його твердість підвищується з 24...28 HRC до 40...45 HRC, 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.

7. Запропонована методика визначення раціональних параметрів газотермічного покриття при заданих витратах, нормованому ресурсі або витратах і ресурсі

одночасно, яка дозволяє значно заощадити кошти, не втрачаючи при цьому заданого рівня ресурсу відновленої деталі. Результати розрахунку за розробленою методикою дають можливість для конкретної деталі підбирати технологічні параметри процесу напилення покриттів в залежності від фінансових можливостей або з точки зору достатності (за ресурсом). Розроблений алгоритм проведення розрахунків при заданих початкових умовах, який дозволяє спрогнозувати ресурс та вартість нанесеного покриття без проведення додаткових, нерідко, дорогих випробувань.

8. Удосконалено спосіб підвищення міцності зчеплення газотермічних покриттів з основою шляхом застосування електролітичних підшарів, нанесених програмно, що дозволяє збільшити міцність зчеплення на 50 % при електродуговому, на 20 % при плазмовому та 12 % при детонаційному напиленні, що суттєво покращує якість ремонту рухомого складу.

9. Визначено вплив тонкої структури на міцність зчеплення шаруватих електролітичних покриттів. Показано, що при інших рівних умовах міцність зчеплення фактично не залежить від шаруватості, а головним чином залежить від параметрів перших адгезійних шарів. Зроблено припущення про зв'язок параметрів тонкої структури та механізмом утворення адгезійних зв'язків покриття з основою. Встановлено, що мінімальному зносу електролітичного заліза відповідає певний розмір блоків мозаїки, який не є єдиним, а залежить від навантаження і коливається в межах від 250 до 700 Å. Встановлено раціональні співвідношення товщин шарів покриття в залежності від їх тонкої структури, при цьому покриття будується з мікрошарів. Шарувата структура електролітичного залізного покриття дозволила підвищити зносостійкість до 1,16...1,21 разів у порівнянні з моношаровими. Таким чином, розроблена технологія «програмного» нанесення покриття дає можливість покращити механічні властивості відновлених деталей, підвищити їх зносостійкість та ресурс.

10. Проведені порівняльні прискорені й експлуатаційні випробування зразків і деталей відновлених шаруватими покриттями показали високі механічні та експлуатаційні властивості, зокрема, зносостійкість та витривалість. Встановлено закономірності зносу деталей, відновлених шаруватими покриттями від пробігу рухомої одиниці. Експериментальні дослідження підтверджують адекватність розроблених моделей. Також показано, що в залежності від поставлених задач, використовуючи розроблені моделі, можна підбирати властивості шарів таким чином, щоб відновлена деталь працювала встановлений термін (пробіг) при мінімально можливих витратах.

11. Запропоновано методику оцінки надійності роботи деталей відновлених шаруватими покриттями, яка дозволяє визначати імовірність безвідмовної роботи цих деталей з врахуванням зносу шарів, як випадкової величини. Проведені розрахунки показують, що імовірність попадання в заданий інтервал розрахункового пробігу становить від 0,83 до 0,96 в залежності від умов експлуатації, типу деталей, технології відновлення та використаних матеріалів.

12. Розрахунки щорічного економічного ефекту від впровадження розроблених технологій в одному ремонтному підрозділі залізниці складає в середньому 1865,4 тис. грн. для наплавлення; 525,7 тис. грн для газотермічного напилення (в середнє значення економічного ефекту не включений ефект відновлення колінчастих валів дизелів); 868,2 тис. грн для електролітичних методів.

Основні положення і результати дисертації опубліковані в таких роботах:

1. Артемчук, В. В. Розробка технології відновлення зношених деталей рухомого складу шаруватими покриттями [Текст] / В. В. Артемчук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2006. – Вип. 11. – С. 92–94.
2. Артемчук, В. В. Дослідження структури багатошарових відновлюючих покриттів, що нанесені газотермічним напиленням [Текст] / В. В. Артемчук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2007. – Вип. 14. – С. 105–107.
3. Артемчук, В. В. Теоретические основы математического моделирования процессов электролитического покрытия [Текст] / В. В. Артемчук, А. А. Босов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2007. – Вип. 15. – С. 52–56.
4. Артемчук, В. В. Определение наборов предикторных переменных по ориентированному графу локальных взаимосвязей [Текст] / В. В. Артемчук, А. А. Босов // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2007. – Вип. 16. – С. 45–49.
5. Артемчук, В. В. Оценка качества восстановления деталей по нескольким показателям [Текст] / А. А. Босов, В. В. Артемчук // Залізн. трансп. України. – К., 2007. – № 3. – С. 66–69.
6. Артемчук, В. В. Дислокаційна модель тертя багатошаруватих покриттів [Текст] / В. В. Артемчук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2007. – Вип. 18. – С. 143–145.
7. Артемчук, В. В. Міцність з'єднання деталей з гарантованим натягом відновлених шаровими покриттями [Текст] / В. В. Артемчук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2008. – Вип. 23. – С. 11–15.
8. Босов, А. А. Математичне моделювання планування експериментів [Текст] / А. А. Босов, В. В. Артемчук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2008. – Вип. 25. – С. 118–121.
9. Артемчук, В. В. Статистичний аналіз зносу елементів автозчепних пристроїв [Текст] / А. А. Босов, В. В. Артемчук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2008. – Вип. 26. – С. 7–10.
10. Артемчук, В. В. Адгезійний механізм зношування при терті [Текст] / В. В. Артемчук, М. А. Грічаний, О. В. Лемешев // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2009. – Вип. 29. – С. 7–10.
11. Артемчук, В. В. Моделювання зносу багатошарового покриття [Текст] / В. В. Артемчук // Проблеми трибології. – № 2, 2011. – С. 59–65.
12. Артемчук, В. В. Реологічні властивості багатошарових матеріалів [Текст] / В. В. Артемчук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2011. – Вип. 37. – С. 20–25.
13. Данилов, Ф. И. Электроосаждение нанокристаллических хром-углеродных сплавов из электролита на основе сульфата трёхвалентного хрома с использованием импульсного тока [Текст] / Ф. И. Данилов, В. С. Проценко, В. О. Гордиенко, А. С. Баскевич, В. В. Артемчук // Физикохимия поверхности и защиты материалов, 2012. – Т. 48. – № 3. – С. 280–285.
14. Protsenko, V. S. Electrodeposition of Nanocrystalline Chromium–Carbon Alloys from Electrolyte Based on Trivalent Chromium Sulfate Using Pulsed Current [Text] / V. S. Protsenko, F. I. Danilov, V. O. Gordiienko, A. S. Baskevich, V. V. Artemchuk // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2012. – Vol. 48. – No. 3. – P. 328–333.
15. Protsenko, V. S. Improving hardness and tribological characteristics of nanocrystalline Cr-C films obtained from Cr(III) plating bath using pulsed electrodeposition [Text] / V. S. Protsenko, F. I. Danilov, V. O. Gordiienko, A. S. Baskevich, V. V. Artemchuk // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2012. – V. 31. – P. 281–283.
16. Артемчук, В. В. Побудова математичної моделі зносу з уточненими параметрами [Текст] / В. В. Артемчук // Проблеми трибології. – № 4, 2011. – С. 121–131.
17. Заблудовський, В. О. Вплив параметрів імпульсного струму у формуванні структури сплавів металів групи заліза з фосфором [Текст] / В. О. Заблудовський, Р. П. Ганич, В. В. Артемчук // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. 13 – № 1. – С. 214–219.
18. Артемчук, В. В. Теоретичні аспекти моделювання зносу багатошарових покриттів [Текст] / В. В. Артемчук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 40. – С. 37–45.

19. Артемчук, В. В. Зносостійкість шаруватого залізного покриття отриманого програмним електролізом [Текст] / В. В. Артемчук // Проблеми трибології. – № 1, 2012. – С. 72–79.
20. Артемчук, В. В. Механізм зношення елементів автозчепного пристрою рухомого складу [Текст] / В. В. Артемчук // Проблеми трибології. – № 2, 2012. – С. 51–57.
21. Артемчук, В. В. Визначення раціональних параметрів шаруватого покриття при відновленні зношених деталей [Текст] / В. В. Артемчук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – № 2/13 (56), 2012. – С. 3–8.
22. Артемчук, В. В. Механізм зношення та деякі властивості матеріалів п'ятникового вузла вантажних вагонів [Текст] / В. В. Артемчук // Вагонний парк. – № 5, 2012. – С. 4–9.
23. Артемчук, В. В. Вибір матеріалів для наплавлення деталей рухомого складу [Текст] / В. В. Артемчук, И. А. Рябцев, Я. П. Черняк // Залізн. трансп. України. – № 2, 2012. – С. 54–57.
24. Заблудовський, В. О. Дослідження структурних перетворень в сплавах Fe-Ni-P, отриманих в нерівноважних умовах електрокристалізації [Текст] / В. О. Заблудовський, Р. П. Ганич, В. В. Артемчук // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. 13. – № 2, 2012. – С. 462–468.
25. Астахов, Є. А. Особливості застосування газотермічного нанесення відновлювальних покриттів / Є. А. Астахов, В. В. Артемчук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – № 3/5 (57), 2012. – С. 4–10.
26. Астахов, Є. А. Структура та властивості аморфних відновлювальних покриттів на основі заліза [Текст] / Є. А. Астахов, В. В. Артемчук // Вісник Нац. техн. ун-ту ХПІ – Х. : НТУ ХПІ – 2012. – № 26. – С. 10–15.
27. Артемчук, В. В. Оцінка надійності технологічного процесу наплавлення [Текст] / В. В. Артемчук, Н. А. Мухіна // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : ДНУЗТ, 2012. – Вип. 41. – С. 57–65.

Додаткові праці:

28. Kostin, N. Mathematical modelling of non-linear electrochemical circuits with pulse sources of voltage [Text] : przegląd elektrotechniczny / N. Kostin, O. Sheikina, V. Artemchuk. – Zakopane, Poland, 2005. – № 2. – Р. 57–60.
29. Артемчук, В. В. Електролітичне залізнення – ефективна ресурсозберігаюча технологія відновлення зношених деталей рухомого складу [Текст] / В. В. Артемчук, М. О. Костін // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, Україна, 2004. – Вип. 8 (78). – С. 11–16.
30. Пат. 40490 Україна, МПК С23С 4/00. Спосіб відновлення зношених деталей шаруватим наплавленням [Текст] / В. В. Артемчук (Україна) // заявл. 19.11.2008; опубл. 10.04.2009. – Бюл. № 7. – 4 с.
31. Пат. 40491 Україна, МПК С23С 4/00. Спосіб відновлення зношених деталей шаруватим наплавленням [Текст] / В. В. Артемчук (Україна) // заявл. 19.11.2008; опубл. 10.04.2009. – Бюл. № 7. – 4 с.
32. Пат. 40492 Україна, МПК С23С 4/00. Спосіб відновлення зношених деталей шаруватим наплавленням [Текст] / В. В. Артемчук (Україна) // заявл. 19.11.2008; опубл. 10.04.2009. – Бюл. № 7. – 4 с.
33. Пат. 51320 Україна, МПК В23Н 9/00. Спосіб нанесення відновлювального покриття [Текст] / В. В. Артемчук (Україна) // заявл. 26.01.2010; опубл. 12.07.2010. – № 201000757. – Бюл. № 13. – 4 с.
34. Рябцев, И. А. Экспериментальная оценка усталостной долговечности наплавленных деталей, имеющих концентратор напряжений [Текст] / И. А. Рябцев, В. В. Артемчук, О. Г. Кузьменко // Залізн. трансп. України. – № 4, 2012. – С. 7–10.
35. Артемчук, В. В. Оценка качества и надежности технологических процессов наплавки деталей подвижного состава железных дорог [Текст] / В. В. Артемчук // Автоматическая сварка. – № 7, 2012. – С. 28–37.
36. Астахов, Є. А. Нанесення шаруватих аморфізованих відновлювальних газотермічних покриттів [Текст] / Є. А. Астахов, В. В. Артемчук // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» – Х. : НТУ «ХПІ» – 2012. – № 33. – С. 28–37.
37. Артемчук, В. В. Необхідні умови в задачі векторної оптимізації для функціоналів стосовно відновлювальних технологій [Текст] / В. В. Артемчук, А. А. Босов // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» – Х. : НТУ «ХПІ». – 2012. – Вип. 34. – С. 41–49.
38. Костін, М. О. Звіт про НДР [Текст] / М. О. Костін, П. Є. Михаліченко, І. Л. Бондар, О. Г. Шейкіна, В. В. Артемчук, О. І. Бондар. – № держреєстрації 0104U006657. – Д., 2005. – 103 с.

39. Костін, М. О. Звіт про НДР [Текст] / М. О. Костін, В. В. Артемчук, Л. В. Пивовар, О. А. Агарков. – № держреєстрації 0108U003887. – Д., 2007. – 117 с.
40. Артемчук, В. В. Обґрунтування використання та механічні властивості багатошарових металевих композитів [Текст] / В. В. Артемчук, Ю. В. Михайленко, Н. А. Мухіна, О. І. Саблін, Р. П. Ганич // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: ДНУЗТ, 2012. – Вип. 42. – С. 20–30.
41. Артемчук, В. В. Інтегральна функція напрацювання до відмови відновлених деталей [Текст] / В. В. Артемчук // Проблеми транспорту № 9, 2012. – С. 42–49.
42. Kostin, N. Mathematical Modeling of Non-linear Electrochemical Circuits with Pulse Sources of Voltage [Text] / N. Kostin, O. Sheikina, V. Artemchuk // Proceedings of the VI International Workshop «Computational Problems of Electrical Engineering». – Zakopane, Poland, 2004. – P. 182–185.
43. Костін, М. О. Нанесення багатошаруватих відновлювальних покриттів [Текст] / М. О. Костін, В. В. Артемчук, П. Є. Михаліченко // Матеріали 4-й Міжнарод. науч.-техн. конф. «Інженерия поверхности и реновация изделий», Киев, 25-27 мая 2004, Ялта-К. : АТМ України. – С. 35–38.
44. Михаліченко, П. Є. Восстановление соединений с гарантированным натягом импульсными электролитическими режимами [Текст] / П. Є. Михаліченко, В. В. Артемчук // Матеріали 4-й Міжнарод. науч.-техн. конф. «Інженерия поверхности и реновация изделий», Киев, 25–27 травня 2004, Ялта-К. : АТМ України. – С. 149–151.
45. Артемчук, В. В. Розробка технології відновлення зношених деталей рухомого складу шаруватими покриттями [Текст] / В. В. Артемчук // 65-а Міжнарод. науч.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп.», Дніпропетровськ, 19–20 травня 2005. – С. 53–54.
46. Артемчук, В. В. Дослідження структури багатошарових відновлюючих покриттів, що нанесені газотермічним напыленням [Текст] / В. В. Артемчук // LXVI Міжнарод. науч.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп.», Дніпропетровськ, 11–12.05.06. – С. 47.
47. Артемчук, В. В. Відновлення натягу деталей нанесенням шарових покриттів [Текст] / В. В. Артемчук // LXVI Міжнарод. науч.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп.», Дніпропетровськ, 11–12 травня 2006. – С. 110.
48. Артемчук, В. В. Багатошарові покриття в концепції дислокаційної моделі тертя [Текст] / В. В. Артемчук // 67-а Міжнарод. науч.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп.», Дніпропетровськ, 24–25 травня 2007. – С. 93–94.
49. Артемчук, В. В. Міцність з'єднання деталей з гарантованим натягом відновлених шаровими покриттями [Текст] / В. В. Артемчук // 12-я Міжнарод. науч.-практ. конф. «Проблеми механіки залізн. трансп.», Дніпропетровськ, 24–25 травня 2008. – С. 23.
50. Артемчук, В. В. Повышение износостойкости деталей путем нанесения слоистых покрытий / В. В. Артемчук // Матеріали Міжнарод. науч. конф. «Трансбалтика-2009», Вильнюс, 22–23 апреля 2009. – С. 21–22.
51. Артемчук, В. В. Сучасні електролітичні технології підвищення працездатності деталей машин [Текст] / В. В. Артемчук // Матеріали 10-й Міжнарод. науч.-техн. конф. «Інженерия поверхности и реновация изделий», Киев, 24–28 мая 2010, Ялта-К. : АТМ України. – С. 17–18.
52. Артемчук, В. В. Сучасні електролітичні методи відновлення деталей рухомого складу залізниць / В. В. Артемчук // 5-я науч.-практ. конф. «Модернизация и переоснащение предприятий. Эффективные технологии ремонта и восстановления деталей». – Д. : Экспо-центр «Метеор», 14.10.2010. – С. 29.
53. Артемчук, В. В. Застосування ресурсозберігаючих технологій на залізничному транспорті [Текст] / В. В. Артемчук // Матеріали 1-й Міжнарод. науч.-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте», Мисхор, 29.09–01.10.2010. – С. 3.
54. Артемчук, В. В. Розробка та використання джерел електричної енергії для ремонтного виробництва залізниць [Текст] / В. В. Артемчук, О. І. Саблін, Ю. С. Сотнік // Матеріали 4-й Міжнарод. науч.-практ. конф. «Электрификация транспорта Трансэлектро–2010», (Мисхор, 27–30 сентября 2010) – Д. : ДНУЗТ, 2010. – С. 6–7.
55. Артемчук, В. В. Відновлення зношених деталей рухомого складу шаруватими електролітичними покриттями [Текст] / В. В. Артемчук // Тези 70-ї Міжнарод. науч.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп.», Дніпропетровськ, 15–16 квітня 2010 – Д. : ДНУЗТ, 2010. – С. 55.
56. Артемчук, В. В. Підвищення зносостійкості та ресурсу деталей механічної частини

рухомого складу [Текст] / В. Артемчук // Матеріали 5-ї Міжнарод. наук.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізн. трансп.: управ-ління, економіка і технології» – Київ, ДЕТУТ, 24.03–25.03 2011. – С. 3–4.

57. Артемчук, В. В. Розвиток системи утримування рухомого складу [Текст] / В. В. Артемчук // Тези 710-ї Міжнарод. наук.-практ. конф. Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп., Дніпропетровськ 14–15 квітня 2011. – Д. : ДНУЗТ, 2011. – С. 61.

58. Артемчук, В. В. Ресурсозбереження в умовах ремонтного виробництва залізн. трансп. [Текст] / В. В. Артемчук // Матеріали II-й Міжнарод. науч.-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте», Ждениево (31 мая–03 июня 2011) – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 4.

59. Артемчук, В. В. Програмний електроліз, як перспективний напрямок відновлення деталей [Текст] / В. В. Артемчук // Матеріали 11-й Міжнарод. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий», Киев, 24–28 мая 2011. – Ялта–К. : АТМ України. – С. 32–33.

60. Артемчук, В. В. Доцільність використання відновлювальних технологій у ремонтному виробництві залізниць [Текст] / В. В. Артемчук, О. В. Хитрий // Матеріали V-й Міжнарод. науч.-практ. конф. «Транселектро–2011», Днепропетровск, 19–21 декабря 2011. – Д. : ДНУЖТ, 2011. – С. 5.

61. Артемчук, В. В. Вплив параметрів імпульсного струму на структуру сплавів відновлюючих покриттів. Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте [Текст] / В. В. Артемчук, Р. П. Ганич // Матеріали 12-го Міжнарод. науч.-техн. семинара, Свалява 20–24 февраля 2012. – К. : АТМ України, 2012. – С. 19–21.

62. Артемчук, В. В. Дослідження впливу параметрів імпульсного струму на формування структури сплавів металів групи заліза [Текст] / В. В. Артемчук, Р. П. Ганич // Тези 72-ї Міжнарод. наук.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізн. трансп.» Дніпропетровськ, 19–20 квітня 2012. – Д. : ДНУЗТ, 2012. – С. 243.

63. Артемчук, В. В. Оцінка надійності технологічного процесу наплавлення [Текст] / В. В. Артемчук, Н. А. Мухіна, Ю. В. Михайленко // Матеріали 12-й Міжнарод. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий», Киев, 04–08 июня 2012. – Ялта–К. : АТМ України. – С. 30–32.

64. Артемчук, В. В. Визначення матеріалів для відновлення деталей рухомого складу наплавленням [Текст] / В. В. Артемчук // Матеріали 12-й Міжнарод. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий», Киев, 04–08 июня 2012. – Ялта–К. : АТМ України. – С. 27–29.

65. Артемчук, В. В. Визначення раціональних параметрів шаруватого покриття при відновленні зношених деталей. [Текст] / В. В. Артемчук // Матеріали 12-й Міжнарод. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий», Киев, 04–08 июня 2012. – Ялта–К. : АТМ України. – С. 29–30.

АНОТАЦІЯ

Артемчук В. В. Наукове обґрунтування відновлення деталей шаруватими покриттями при ремонті рухомого складу залізниць. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2012 р.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової проблеми підвищення ресурсу та надійності експлуатації залізничного рухомого складу при ремонті. Поставлена та розв’язана задача зі встановлення зв’язків між параметрами технологічних процесів відновлення деталей рухомого складу залізниць, структурою та властивостями шаруватих покриттів.

Розроблена та представлена в дисертаційній роботі математична модель із визначення раціональних параметрів відновлювального шаруватого покриття деталей рухомого складу при ремонті, яка дозволяє підприємству встановлюва-

ти раціональні режими та технологію відновлення зношених деталей з врахуванням вартісних показників процесу.

Використовуючи інструменти векторної оптимізації, запропонований алгоритм оцінки якості відновлення деталей рухомого складу за декількома показниками. Розроблено рекомендації відносно вибору режимів, технології і техніки відновлення зношених деталей рухомого складу шаруватими покриттями, що забезпечують високу якість і надійність експлуатації обраних деталей.

Запропонована методика оцінки надійності роботи деталей, відновлених шаруватими покриттями, яка дозволяє визначати імовірність безвідмовної роботи цих деталей з врахуванням зносу матеріалу шарів, як випадкової величини.

Ключові слова: надійність, рухомий склад, технологія ремонту, відновлення деталей, технологічний процес, наплавлення, газотермічне напилення, електролітичні методи, знос, зносостійкість, шаруваті покриття.

АННОТАЦИЯ

Артемчук В. В. Научное обоснование восстановления деталей слоистыми покрытиями при ремонте подвижного состава железных дорог. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта. - Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2012 г.

Диссертация посвящена решению научной проблемы повышения ресурса и надежности эксплуатации железнодорожного подвижного состава при ремонте. Ремонтное производство является важным звеном обеспечения эффективного функционирования подвижного состава, но при этом требует значительных финансовых затрат. Учитывая, что ремонтное производство существенно влияет на экономические показатели работы подвижного состава, в диссертационной работе была поставлена задача – разработать или усовершенствовать технологии восстановления на основе наиболее распространенных в ремонтном производстве железной дороги, а именно наплавки, газотермического напиления и электролитических методов. То есть согласно идеологии работы необходимо обеспечить максимально возможную надежность и определенный ресурс деталей подвижного состава при минимальных затратах.

Среди деталей механической части подвижного состава на основе анализа условий эксплуатации, степени износа, количества элементов и стоимостных показателей выделены типичные по взаимодействию группы деталей и исследованы механизмы изнашивания контактных поверхностей. Для выделенных деталей установлены закономерности изменения параметров состояния в процессе эксплуатации.

Поставлена и решена задача по установлению связей между параметрами технологических процессов восстановления деталей подвижного состава железной дороги, структурой и свойствами слоистых покрытий. В работе показано, что регулируя параметры технологического процесса нанесения покрытий, можно получать слои с заданными (ожидаемыми) свойствами. Установлено, что для получения композиционного слоистого покрытия методами наплавки и га-

зотермического напыления наиболее целесообразно использовать различные материалы, комбинируя их в зависимости от потребностей ремонтного производства. Получение слоистости покрытий электролитическими методами наиболее целесообразно путем изменения электрических режимов источника питания и в меньшей степени, комбинируя слои, полученные в различных электролитах, из различных материалов. Отмечено, что слоистое покрытие можно представить в виде реологической модели, что позволяет применять реологические модели при исследовании износа контактирующих тел, а также использовать предложенные способы для измерения реологических свойств тел (слоев) восстановленных деталей.

Разработана и представлена в диссертационной работе математическая модель по определению рациональных параметров восстанавливающего слоистого покрытия деталей подвижного состава при ремонте, которая позволяет предприятию устанавливать рациональные режимы и технологию восстановления изношенных деталей с учетом стоимостных показателей процесса. Установлено влияние вариации толщины слоев и их механических свойств на срок службы. Показано, что в зависимости от поставленных задач, используя разработанные модели, можно подбирать слои таким образом, чтобы восстановленная деталь работала установленный срок (пробег) при минимально возможных при этом затратах.

Используя инструменты векторной оптимизации, предложен алгоритм оценки качества восстановления деталей подвижного состава по нескольким показателям. Разработан алгоритм проведения расчетов при заданных начальных условиях, что позволяет спрогнозировать ресурс и стоимость нанесенного покрытия без проведения дополнительных, нередко, дорогих испытаний.

Разработаны рекомендации относительно выбора режимов, технологии и техники восстановления изношенных деталей подвижного состава слоистыми покрытиями, обеспечивающими высокое качество и надежность эксплуатации выбранных деталей.

Предложена методика оценки надежности работы деталей, восстановленных слоистыми покрытиями, которая позволяет определять вероятность безотказной работы этих деталей с учетом износа материала слоев, как случайной величины.

Ключевые слова: надежность, подвижной состав, технология ремонта, восстановление деталей, технологический процесс, наплавка, газотермическое напыление, электролитические методы, износ, износостойкость, слоистые покрытия.

ABSTRACT

Artemchuk V. V. Scientific substantiation of recovering the parts by layered coatings in repair of railway rolling stock. – Manuscript.

A thesis for competition of the academic degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.22.20 – Operation and Repair of Vehicles. – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipropetrovs'k, 2012.

The thesis is devoted to solving the scientific problem of increasing the service life

and reliability of operation of rolling stock during its repair. The problem of determining the relations between the parameters of technological processes for recovery of railway rolling stock parts, the structure and the properties of layered coatings is formulated and solved. It is shown in the thesis that by adjusting the parameters of the coating technological process of depositing the layers can be obtained with the specified (anticipated) properties.

A mathematical model to determine the rational parameters of recovering layered coating of the rolling stock parts during a repair, which enables the company to set rational modes and technology of recovering the worn taking into account the cost indices of the process is developed and presented in the thesis.

Using the vector optimization instruments, an algorithm for assessment of the quality of recovering the rolling stock parts in several indices is suggested.

The recommendations on the choice of modes, technologies and techniques of recovering the worn rolling stock parts by the layered coatings ensuring the high quality and reliability of operation of parts selected are developed.

The procedure for estimating the reliability of parts recovered by layered coatings, which allows determining the probability of failure-proof operation of these parts taking into account the wear of material of the layers as a random value, is suggested.

Keywords: reliability, rolling stock, repair technology, restoration of parts, technological process, surfacing, gas thermal spraying, electrolytic methods, wear, abrasion resistance, layered coatings.

Артемчук Віктор Васильович

НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ
ШАРУВАТИМИ ПОКРИТТЯМИ ПРИ РЕМОНТІ
РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Підписано до друку 01.09.2012. Формат 60x84 1/16.
Ум. друк. арк. 1.88. Обл.-вид. арк. 1,90.
Тираж 130 пр. Зам. №_____

Видавництво Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса видавництва та дільниці оперативної поліграфії:
49010, Дніпропетровськ, 10, вул. Лазаряна, 2