

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

На правах рукопису

КУЛІЧЕНКО АНАТОЛІЙ ЯКОВИЧ

УДК 629.46

**НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ
РЕМОНТНОГО ВИРОБНИЦТВА ВАНТАЖНИХ ЗАСОБІВ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Дисертація
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ 2011

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. Сучасний стан ремонтного виробництва вантажних засобів залізничного транспорту	15
1.1. Загальний стан ремонтної бази вантажних вагонів	16
1.2. Основні проблеми вагоноремонтного виробництва	19
1.3. Технологічні процеси ремонту елементів вагонів	23
1.3.1. <i>Очистка виробів від технічного бруду та лакофарбового покриття</i>	<i>27</i>
1.3.2. <i>Якісне формування характеристик поверхні елементів вагонів</i>	<i>31</i>
1.4. Поширені у практиці методи обробки поверхонь при ремонтно-відновлювальних роботах	35
1.4.1. <i>Підготовка до ремонту поверхні виробів методами механічного контактування</i>	<i>37</i>
1.4.2. <i>Поверхнева обробка із застосуванням теплових властивостей електричного струму</i>	<i>40</i>
1.5. Висновки	43
РОЗДІЛ 2. Концептуальні методи процесів очисно-зміцнюючої обробки при ремонті деталей вантажних вагонів	46
2.1. Оптимальний маршрут технологічних процесів на виробничих ремонтно-відновлювальних комплексах	47
2.2. Типізація технологічних процесів ремонтних робіт	50
2.3. Класифікація ремонту методами якісного формування поверхні деталей	54
2.4. Принципові схеми контактування інструменту із поверхнею обробки	56
2.5. Висновки	64

РОЗДІЛ 3. Математичні моделі механізму якісного формування	
поверхні у процесі очисно-зміцнюючої обробки	65
3.1. Якісне формування поверхні деталей методами	
пружно-пластичного деформування	66
3.1.1. Контактна взаємодія одиничного елемента інструменту	
з поверхнею обробки	69
3.1.2. Динамічний вплив на поверхню деталей робочих	
елементів інструменту	83
3.1.3. Поширення теплових полів у матеріалі обробки	
внаслідок контактування елементів тертям ковзання	89
3.2. Вплив миттєвого високотемпературного електророзряду	
на якісні характеристики поверхні обробки	99
3.2.1. Кінематика переміщення поверхнею теплового джерела	100
3.2.2. Поширення температури електродугового розряду	
у шарах поверхневих композитних відкладень	103
3.3. Висновки	113
РОЗДІЛ 4. Аналіз і синтез системи структурної та параметричної	
оптимізації технології очисно-зміцнюючих процесів	
ремонті деталей вантажних вагонів	116
4.1. Встановлення показників оптимізації процесу	118
4.2. Оптимізація процесу механічної обробки	123
4.3. Оптимізація термомеханічного технологічного процесу	131
4.4. Методика вибору оптимального процесу ремонтних робіт .	135
4.5. Висновки	137
РОЗДІЛ 5. Інтегроване комп'ютерно-програмне забезпечення	
технологічної підготовки ремонтного виробництва.....	138
5.1. Методика програмування технологічних процесів	
ремонтних робіт	139
5.2. Програмне визначення впливу параметрів процесу	

обробки на показники шорсткості поверхні	144
5.3. Прогнозоване встановлення показників степеню зміцнення поверхневого шару металу	153
5.4. Програмування впливу технологічних параметрів обробки на формування внутрішніх залишкових напружень	165
5.5. Комп'ютерно-програмне прогнозування змін температурних характеристик у процесі поверхневої обробки	174
5.6. Висновок	180
РОЗДІЛ 6. Основні положення методики проектування технологічних процесів формозмінюючої та очисно-зміцнюючої обробки	186
6.1. Загальна характеристика технологічних процесів ремонтно-відновлювальних робіт	187
6.2. Очистка поверхні металевих виробів	190
6.2.1. Видалення шару масложирового бруду	191
6.2.2. Очищення поверхні від корозійного нашарування	195
6.3. Формування показників шорсткості поверхні деталей	201
6.4. Вплив технологічних режимів процесу обробки на зміцнення поверхневого шару деталей вагонів	219
6.5. Механізм формування у матеріалі обробки внутрішніх залишкових напружень	233
6.6. Висновки	241
РОЗДІЛ 7. Методика проектування технологічного обладнання та оснащення процесу очисно-зміцнюючої обробки	246
7.1. Класифікації деталей вантажних залізничних вагонів	247
7.2. Класифікація конструкцій механізмів та інструменту для ремонтних робіт методом термомеханічної обробки	254

7.3.	Обладнання та оснащення для термомеханічної обробки деталей з листового і фасонного прокату	257
7.4.	Механізми обробки циліндричних та криволінійних поверхонь	270
7.5.	Ремонт зміцненням ободів вагонних коліс	285
7.6.	Обладнання для обробки поверхонь виливок та зварювальних швів	293
7.7.	Засоби очищення плоских поверхонь кузовів конструкцій вантажних залізничних вагонів	300
7.8.	Обладнання процесів механічної та термомеханічної обробки поверхонь котлів залізничних цистерн	302
7.8.1.	<i>Обробка зовнішніх поверхонь котлів цистерн</i>	<i>303</i>
7.8.2.	<i>Обробка внутрішніх порожнин котлів</i>	<i>317</i>
7.9.	. Економічні показники та порівнювальний аналіз технологічного процесу ремонтних робіт	326
7.10	Висновки	3325
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ		340
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		350
ДОДАТКИ		

ВСТУП

Актуальність теми. Домінуючою задачею перевезень вантажів залізничним транспортом є підвищення його ефективності та безпека в експлуатації вантажних засобів рухомого складу, тому безперервно і цілеспрямовано здійснюються роботи по розвитку матеріально-технічної бази залізниці, основною складовою якої є вагоноремонтні підприємства. Від чіткої і злагодженої роботи всіх підрозділів даних спеціалізованих підприємств залежить безперебійність і безпека руху поїздів та своєчасне забезпечення перевезень технічно справним рухомим складом. Зростання обсягу вантажних перевезень стальними магістралями є неможливим без вдосконалення вагоноремонтної бази, ефективного використання виробничих потужностей, оптимальної реалізації існуючих та розробки і впровадження нових технологій ремонтних робіт.

На даний час у вагоноремонтному виробництві впроваджені техпроцеси ремонтно-відновлювальних робіт по підвищенню міцності, надійності та довговічності деталей, вузлів та конструкцій вантажних засобів залізниці. Але значна кількість одиниць вантажних засобів колійного транспорту, які направляються на вагоноремонтні підприємства, мають поряд із експлуатаційними зношуваннями елементів, ще й значне руйнування матеріалу деталей і конструкцій внаслідок утворення поверхневого корозійного нашарування, викликаного як впливом атмосферних і технічних уражень, так і внаслідок дії транспортованих хімреактивів.

Поширені у вагоноремонтному виробництві ряд методів і засобів захисту поверхні металу від корозійного ураження та забезпечення його тривалого збереження є не досить ефективними, оскільки недостатньо вирішена основна задача - підготовка поверхні перед нанесенням захисного покриття. На діючих вагоноремонтних підприємствах традиційно технологічні процеси нанесення поверхневого захисту на елементи вагонів відносяться до завершальних етапів ремонту і вони відокремлені від загальних техпроцесів ремонтних робіт, що пояснюється специфікою

консервації поверхні, складністю конструкцій та громіздкістю технологічного обладнання, розташованого у більшості своїй за межами виробничих цехів. Таке розмежування техпроцесів ускладнює ритмічність загального виробничого процесу і не сприяє інтенсифікації та узгодженості ремонтних робіт, суттєво впливає на терміни перебування вагонів у текучому ремонті.

Актуальність проблеми полягає у необхідності модернізації вагоноремонтних виробництв шляхом впровадження сучасних високопродуктивних екологічно чистих ресурсо- та енергозощаджуючих технологій ремонту вантажних засобів залізниці, здатних комплексно поєднувати процеси як якісного формування поверхневого шару виробів, так і одночасної його підготовки перед нанесенням захисного антикорозійного покриття, що можливо лише за умови розробки нових технічних рішень та технологій.

Зв'язок теми дисертації з напрямками науково-дослідних робіт. Основні теоретичні дослідження та практичні впровадження авторських технічних розробок проводились співшукачем у Львівській філії Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна згідно госпдоговірних тематик 1.8407-31.0188 “Дослідження пошкоджень осей колісних пар вантажних вагонів та визначення терміну їх експлуатації” та 33.155 “Дослідження руйнувань колісних пар вагонів вантажних перевезень та розробка рекомендацій щодо подальшого їх використання” (ДР 010800030630).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності ремонтного виробництва вантажних засобів залізничного транспорту на базі створення науково-технологічних основ шляхом розробки ітераційно-рекурентних методик проектування формозмінюючих і очисно-зміцнюючих технологічних процесів і реалізуючого обладнання та оснащення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Провести аналіз сучасного стану та перспектив розвитку ремонтного виробництва вантажних засобів залізничного транспорту в частині застосування

очисно-зміцнюючих технологічних процесів і реалізуючого оснащення та обладнання.

2. Розробити і реалізувати основні концептуальні методи процесів руйнування та видалення з поверхні деталей шарів залишкових відкладень органічних та композитних матеріалів і методів відновлення таких поверхонь з підвищеними механічними властивостями.

3. Розробити математичну модель механізму очисно-зміцнюючих технологічних процесів формозмінення та якісного формування поверхонь великогабаритних конструкцій, вузлів і деталей вантажних вагонів при пружно-пластичному деформуванні.

4. Розробити математичну модель механізму очисно-зміцнюючих технологічних процесів якісного формування поверхонь виробів від теплового впливу біжучого миттєвого високотемпературного електророзряду та модель комплексної обробки при суміщеній дії теплового та динамічного факторів.

5. Розробити теоретичні основи аналізу та синтезу системи ефективної структурної та параметричної оптимізації очисно-зміцнюючих процесів ремонту вантажних засобів залізничного транспорту.

6. Розробити систему класифікації деталей вантажних вагонів і методику проектування технологічних процесів очисно-зміцнюючої обробки та реалізуючого обладнання та оснащення.

7. Розробити математичну модель встановлення оптимальних технологічних режимів процесу механічної та термомеханічної очистки та зміцнюючої поверхню обробки окремих деталей та великогабаритних конструкцій засобів вантажного залізничного транспорту.

8. Реалізувати інтегроване комп'ютерно-програмне забезпечення технологічної підготовки ремонтного виробництва на основі концепції технологічного забезпечення та моделювання техпроцесів поверхневої формозмінюючої та очисно-зміцнюючої обробки.

9. Розробити нові конструкції високопродуктивного екологічно чистого ресурсо- та енергозаощаджуючого технологічного обладнання та оснащення з

розширеними технологічними можливостями та провести техніко-економічне порівнювання з існуючими методами і засобами підготовки до ремонту елементів вагонів.

Об'єкт дослідження— очисно-зміцнюючі процеси ремонту деталей вантажних залізничних вагонів.

Предмет дослідження - технологічні процеси очисно-зміцнюючого ремонту деталей вантажних вагонів залізничного транспорту.

Методи дослідження – основні положення технології металообробки, теорії ймовірності, математичного аналізу та числових методів вирішення диференціальних рівнянь, теорії моделювання та оптимізації, евристичного прогнозування, методи ітераційного та варіаційного числення, методи тензометрії та статистичної обробки експериментальних результатів.

Достовірність теоретичних положень, висновків і рекомендацій роботи підтверджено результатами експериментальних досліджень та практикою промислового впровадження нових технологій, установок та інструментів.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації реалізовано нову концепцію ремонтного виробництва, яка полягає в поєднанні й одночасному застосуванні формозмінюючих та очисно-зміцнюючих технологій на основі нових технологічних процесів комплексної очисно-зміцнюючої поверхневої обробки елементів конструкцій вантажних засобів залізничного транспорту. Для цього

вперше:

– на основі дослідження процесів адгезії між поверхнею металу та шаром плівки масложирового відкладення різних динамічних коефіцієнтів в'язкості встановлено мінімальне тангенціальне зусилля для їх сегрегації. Встановивши взаємозв'язок між межею міцності та твердістю в матеріалах атмосферної, електрохімічної й технологічної корозії, прокатної окалини, розроблено механізм їх руйнування, що дозволить призначати потрібні технологічні режими обробки для видалення наведених органічно-композитних

накопичень з поверхонь великогабаритних конструкцій, вузлів та деталей залізничних вантажних вагонів і котлів цистерн;

– розроблено теоретичну модель очищення та якісного формування поверхневих шарів деталей та великогабаритних конструкцій вантажних засобів залізниці через пружно-пластичне деформування залежно від фізико-механічних особливостей матеріалів обробки, в основі якої механізм руйнування поверхневих органічно-композитних накопичень. Це дає змогу, на відміну від відомих методів пружно-пластичного деформування, застосовувати нетрадиційний технологічний інструмент, де як робочі елементи застосовуються гнучкі та жорсткі елементи, які здатні формувати поверхню виробів з необхідними показниками її шорсткості, ступенем зміцнення поверхневого шару та стабілізованими внутрішніми залишковими напруженнями;

– розроблено механізм впливу біжучого миттєвого високотемпературного електророзряду на поверхню обробки елементів вантажних вагонів на основі розв’язання крайової задачі нестационарного поширення теплового потоку всією товщиною поверхневого нашарування композиту за умови різних фізико-механічних характеристик кожного із шарів. За відсутності аналогів у сучасній практиці це дає змогу за допомогою технологічного інструменту з гнучкими робочими елементами здійснювати руйнування монолітності й видалення поверхневого композиту з будь-яким ступенем його твердості, видаляти товстий і важкопіддатливий шар литтєвого пригару й очищувати від облою та формувати зварювальні шви;

– виявлено та реалізовано закономірності комплексної інтеграції якісного формування та формозмінення поверхневих шарів деталей, вузлів і великогабаритних конструкцій вантажних засобів залізничного транспорту під дією суміщеного термомеханічного та пружно-динамічного впливу. За відсутності аналогів у сучасній практиці це дозволяє, використовуючи метод математичного прогнозування для призначення цьому виробу належних технічних характеристик, здійснювати початкове поверхнєве очищення для підготовки елементів вагонів до діагностики руйнування та ремонтних робіт і

подальшого технологічного комплексу ремонтно-відновлювальної роботи, яка передбачає якісне формування поверхні деталей комбінованими інструментами з гнучкими та жорсткими робочими елементами для здійснення технологічних операцій з підготування поверхні металу перед нанесенням антикорозійного покриття і забезпечення потрібними для надійної експлуатації виробу якісними характеристиками поверхневого шару матеріалу;

набули подальшого розвитку:

– науковий підхід до аналізу і синтезу ефективної структурної та параметричної оптимізації інтегрованих формозмінюючих і очисно-зміцнюючих технологічних процесів ремонту деталей та великогабаритних конструкцій вантажних засобів колійного транспорту. В основі цього підходу – синтез множини парето-оптимальних рішень із визначенням переважальних критеріїв оптимальності та призначення показників оптимізації процесу – технологічний процес ремонту, його енергоємність та показник екологічної безпеки ремонтних робіт. На відміну від наявних методів оптимізації це дозволяє оптимізувати процес механічної й термомеханічної обробки поверхні деталей, де домінантним критерієм заведено вважати показник ефективності ремонтних робіт – приведені витрати, встановлений згідно з методами варіантної і параметричної оптимізації основних критеріїв техпроцесу, у якому методом візуалізації множини можливих векторів одержано просторову систему;

– система класифікації деталей вантажних вагонів, яка на відміну від інших відомих систем ґрунтується на логічній операції розподілу множини складових елементів засобів рухомого складу на окремі групи (підмножини), що задовольняють формальні вимоги, виражені сумарно, дають вихідну множину класифікованих об'єктів (деталей), кожен з яких входить до якогось одного класу з характерними й узагальнювальними критеріями. На основі цієї системи класифікації деталей можна розробити методику проектування технологічних процесів очисно-зміцнюючої обробки, які полягають у проектуванні технологічного маршруту ремонтних робіт і визначенні оптимальної структури окремих операцій. Окрім того, розроблена класифікація дозволяє,

узагальнивши характерні особливості кожної окремо взятої деталі, створити груповий технологічний процес ремонтно-відновлювальних робіт;

удосконалено:

– методику проектування очисно-зміцнюючого технологічного реалізуючого обладнання й оснащення, призначених для ремонту залізничних вантажних вагонів та котлів цистерн. Від раніше відомих методик вона відрізняється тим, що враховує вузькоспеціалізоване призначення цього виду технологічного обладнання, дає змогу проектувати згідно із системою модулів, де кожен окремий модуль адаптований до певної типової групи деталей, вузлів та великогабаритних конструкцій вантажних засобів залізничного транспорту з урахуванням розробленої математичної моделі встановлення потрібних технологічних режимів процесу механічного й термомеханічного очищення та зміцнювальної поверхню обробки. Це дасть змогу під час підготовки до ремонту і безпосередньо у процесі ремонтних робіт проектувати, виготовляти і застосовувати оптимальні і дешеві конструкції технологічного обладнання й оснащення, що вигідно відрізняються від наявних методик проектування передусім своїми можливостями якісно і з високою продуктивністю формувати поверхню основного металу виробів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні технологічних методик якісного формування поверхневих шарів деталей, вузлів і великогабаритних конструкцій вантажних засобів залізничного транспорту, аналізу та синтезу процесу термомеханічного формозмінення й безпомилково встановлювати якісні технологічні властивості об'єктів ремонтного виробництва.

Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення реалізації технологічних процесів якісного формування та підготовки для нанесення антикорозійного покриття робочих поверхонь деталей та великогабаритних конструкцій вантажних засобів залізниці.

На прикладному рівні запропоновано інженерну методику комплексної очисно-зміцнюючої обробки великогабаритних конструкцій, вузлів і деталей

вантажних вагонів. Розроблене програмне забезпечення для реалізації такої методики дає змогу в автоматизованому режимі розв'язати задачу вибору необхідних для експлуатації якісних характеристик.

Розроблено методику проектування технологічного обладнання та оснащення. Створено на рівні винаходів оригінальні конструкції технологічного обладнання й інструменту для вагоноремонтного виробництва.

Результати дисертаційної роботи впроваджені у вагонному депо ВЧД-2 Дрогобич (Львівська залізниця) для очищення вагонних колісних пар та зовнішньої поверхні котлів залізничних цистерн перед їх повторним фарбуванням (акт впровадження від 04.04.2006); у вагоноремонтному депо ВЧД-4 Клепарів (Львівська залізниця) для очищення і якісного формування поверхні деталей колісних пар залізничних вагонів (акт впровадження від 24.01.2006); на Петрівському заводі стінових матеріалів і конструкцій (м. Київ) для очищення від продуктів корозії штабових закладних деталей залізобетонних конструкцій перед їх оцінюванням (акт впровадження від 11.05.1992; НДР № 5763, ЛПП НДЛ-39) та виливок від литтєвого пригару (договір на передачу н/т продукції № 6098 від 26.01.1997; ДУЛП НДЛ-39); на ВО верстатів-автоматів (м. Київ) для обробки внутрішніх поверхонь отворів, фігурних контурів і ребер жорсткості литих станин верстатів від литтєвого пригару й окалини (акт впровадження № 6127 від 01.10.1996; ДУЛП, НДЛ-39).

Особистий внесок здобувача. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень здобувач одержав самостійно на базі власних ідей та опрацювань. Наукові праці [1, 6, 9, 10, 12, 13, 15, 18–25, 27–35, 37, 39, 44] автор виконав одноосібно. Особистий внесок автора в наукових працях, опублікованих у співавторстві, такий:

– у [4, 11, 14, 17, 36, 41] – проведено аналіз досліджень динамічних процесів та введено нові динамічні закономірності, потрібні для побудови комплексу моделей: при взаємодії з поверхнею обробки одиничних робочих елементів інструментів; механізму контактної взаємодії; особливостей просторового переміщення елементів обробки; взаємодії контактуючих поверхонь

з різними якісними показниками матеріалу, що впливають на зносостійкість елементів інструментів і поверхню обробки;

- у [38] – теоретично встановлено поширення теплових полів у багатошаровій поверхні металу;

- у [2, 7, 16, 40, 42, 43] – розроблено методику та проведено аналіз статичних і динамічних випробовувань деталей вантажних вагонів на міцність, надійність, ефективність поверхневої обробки та тривалість експлуатації якісно сформованої поверхні;

- у [3, 8] – запропоновано методики вибору ефективних режимів технологічних процесів ремонтних робіт.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та одержали позитивну оцінку на науково-технічних конференціях: Міжнародній конференції „Сучасні матеріали, технології, обладнання та інструмент в машинобудуванні” (Київ, 2000); 65-а Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту” (Дніпропетровськ, 2005); Національних конференціях „Високоєфективні технології в машинобудуванні” (Алушта, 1998), „Ресурсо- і енергозберігаючі технології у промисловості” (Одеса, 1998), „Композиційні матеріали у високоєфективних технологіях механоскладального виробництва” (Алушта, 1999) та „Лазерні і фізико-технічні методи обробки матеріалів” (Київ, 1999); LXVI Міжнародній науково-практичній конференції „Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту” (Дніпропетровськ, 2006); II науково-практичній міжнародній конференції „Впровадження наукоємних технологій на магістральному і промисловому залізничному транспорті” (Крим, Алушта, 2006); V Міжнародній науковій конференції „Проблеми економіки транспорту” (Дніпропетровськ, 2006 р.); 67 та 68 Міжнародних науково-практичних конференціях „Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту” (Дніпропетровськ, 2007, 2008 та 2009 р.р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування» (Луцьк, 2009 р.); 10-ому Ювілейному

Міжнародному науково-технічному семінарі «Сучасні проблеми виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті» (Свалява, Закарпат. обл., 2010 р.); Міжнародна науково-технічна конференція ТК-2010 «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів» (Луцьк, 2010 р.).

Дисертація у повному обсязі доповідалась та отримала схвалення в Українській державній академії залізничного транспорту (м. Харків) у 2007 р., Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна (м. Дніпропетровськ) у 2007, 2009 та 2010 роках.

Публікації. Результати дисертації представлені в 50 публікаціях, серед яких 1 наукова монографія, 1 навчальне видання, 44 статей в наукових фахових журналах та збірниках наукових праць (з них 28 одноосібних), 4 патентів України на винахід.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел з 320 найменувань і додатків. Дисертація викладена на 377 сторінках, з них 288 сторінки основного тексту, містить 108 рисунків, 15 таблиць і 96 стор. додатків.