

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ФАКУЛЬТЕТ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ

Кафедра технічного сервісу та інженерного менеджменту  
імені М.П.Момотенка

УДК 629.083:005.931.13:629.3.004

**ПОГОДЖЕНО**

Декан факультету конструювання та  
дизайну

к.т.н., доцент

Зіновій РУЖИЛО

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри технічного сервісу  
та інженерного менеджменту

імені М.П.Момотенка

Іван РОГОВСЬКИЙ

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

**МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**на тему: «УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ  
ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КОМПОЗИЦІЙНИХ  
ПОКРИТТІВ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ ЛІСОВОГО  
КОМПЛЕКСУ»**

Спеціальність – 133 «Галузеве машинобудування»

Освітня програма – «Обладнання лісового комплексу»

Орієнтація освітньої програми – освітньо-професійна

**Гарант освітньої програми:**

Кандидат технічних наук, доцент \_\_\_\_\_

**Олександр БАННИЙ**

«підпис»

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

д.т.н., професор \_\_\_\_\_

**Іван РОГОВСЬКИЙ**

«підпис»

**Виконав** \_\_\_\_\_

**Артур СИДОРУК**

«підпис»

**Київ – 2024**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**ФАКУЛЬТЕТ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ**  
Кафедра технічного сервісу та інженерного менеджменту  
імені М.П.Момотенка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту  
імені М.П.Момотенка,

\_\_\_\_\_ **Іван РОГОВСЬКИЙ**

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**

Сидоруку Артуру Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність – 133 «Галузеве машинобудування»  
Освітня програма – «Обладнання лісового комплексу»  
Орієнтація освітньої програми – освітньо-професійна

**Тема магістерської кваліфікаційної роботи:** «Удосконалення технології електротермічної обробки композиційних покриттів деталей обладнання лісового комплексу».

затверджені наказом ректора НУБіП України від «29» грудня 2023 року №2398 «С»

**Термін подання завершеної роботи на кафедру:** 30.11.2024 р.

**Вихідні дані до роботи:**

1. Науково – технічна література; результати науково-дослідних робіт по літературних джерелах електротермічної обробки композиційних покриттів деталей обладнання лісового комплексу

**Перелік питань, що підлягають дослідженню:**

1. Композиційні електрохімічні покриття (КЕП) для відновлення обладнання лісового комплексу
2. Спеціальні методики дослідження властивостей КЕП
3. Взаємозв'язок структури, міцності та зносостійкості електролітичних композитів
4. Формування зв'язку дисперсної фази і матриці композитів
5. Розробка технологічних основ, техніко-економічне обґрунтування технологічного процесу електротермічної обробки КЕП

**Дата видачі завдання** 18.09.2023 р.

**Керівник магістерської  
кваліфікаційної роботи**

\_\_\_\_\_ **Іван РОГОВСЬКИЙ**

( підпис ) (прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання**

\_\_\_\_\_ **Артур СИДОРУК**

( підпис ) (прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1 СТАН ПРОБЛЕМИ .....</b>	<b>7</b>
1.1. Композитні електрохімічні покриття (СЕР) для реабілітації лісових ділянок.....	7
1.2. Електротехнічні технології модифікації зносостійких КЕП. ....	12
1.3 Проблеми електричної модифікації КЕП.....	15
<b>РОЗДІЛ 2 ЗАВДАННЯ І ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....</b>	<b>19</b>
2.1. Ставте завдання .....	19
2.2. Загальна методологія дослідження .....	22
2.3. Спеціальні методи дослідження властивостей КЕП .....	27
2.4. Визначення об'ємного вмісту дисперсної фази в композиційному матеріалі методом мікротвердості.....	30
2.5. Підготовка результатів дослідження.....	32
<b>РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТАНОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КЕП.....</b>	<b>36</b>
3.1. Питання дослідження.....	36
3.2. Взаємозв'язок міцнісних властивостей електролітичних осадів зі своєю структурою.....	38
3.3. Зв'язок між структурою, міцністю та зносостійкістю електролітичних композиційних матеріалів .....	43
3.4. Утворення сполуки дисперсної фази та матриці композиційних матеріалів .....	44
3.5. Висновки .....	48
<b>РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ КЕП .....</b>	<b>50</b>
4.1. Питання дослідження.....	50
4.2. Порядок проведення дослідження.....	52
4.3. Результати дослідження та їх обговорення .....	56

4.4. Взаємодія між компонентами КЕП в електроопаленні.....	59
4.5. Висновки .....	63
<b>РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОСНОВИ, ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНОГО ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КЕП .....</b>	<b>64</b>
5.1. Питання дослідження.....	64
5.2. Результати дослідження та їх обговорення .....	67
5.3. Організація відновлення та армування деталей електромодифікованими КЕП.....	69
5.4. Технологічний процес і обладнання для нанесення та електромодифікації КЕП.....	71
5.5. Відпрацювання технологічного процесу та експериментальна перевірка деталей з електромодифікованим КЕП.....	73
5.6. Висновки .....	76
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>77</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>79</b>

## ВСТУП

У сучасній техніці існує нагальна потреба в матеріалах, здатних витримувати тривалі високі механічні та термічні навантаження та успішно протистояти руйнівній дії зношування, агресивних середовищ, зміни знака та контактних навантажень. Для підвищення довговічності та міцності деталей у машинобудуванні та ремонті широко використовують гальванічні покриття. Удосконалюються способи їх нанесення на деталі та різного роду модифікації (механічної, хіміко-термічної обробки та ін.). Проте аналіз технічного оснащення лісогосподарського комплексу свідчить про низьку забезпеченість виробників лісової сировини технікою та обладнанням.

Перспективним напрямком у розвитку технології відновлення та підвищення зносостійкості є гальванічне нанесення зносостійких покриттів із суспензій електролітів (ЕС) з подальшою електротермічною обробкою. Отримання нових матеріалів з унікальними властивостями при повному переплавленні покриття.

У пропонованій кваліфікаційній магістерській роботі розроблено технологічні основи відновлення та підвищення довговічності частин обладнання лісогосподарського комплексу зносостійкими КЕП з подальшою електротермічною обробкою з метою заповнення прогалини в області теоретичних і прикладних аспектів. вирішення найважливішої економічної проблеми економії матеріальних і енергетичних ресурсів.

У роботі вперше проведено теоретичне обґрунтування досягнення високоміцного стану металів електролітичним осадженням шляхом формування їх нерівноважних дислокаційних структур, що зумовлюють їх високі дисперсні та експлуатаційні властивості. На прикладі заліза, його сплавів та КЕП на їх основі проведено аналіз експериментальних даних. Отримано закономірності зміни механічних властивостей зносостійких покриттів залежно від дислокаційної структури, що утворюється в процесі їх отримання (електроліз, у післяелектролізний період та в процесі

електротермічної обробки). Виявлено його зв'язок з кінетичними параметрами електродних процесів і параметрами електротермічної обробки. Електротермічний ефект призводить до зміни фізико-механічних властивостей покриттів і їх загальної неоднорідної структури (електромодифікації). Встановлено галузь застосування модифікованого електролітичного заліза для відновлення та зміцнення деталей та запропоновано спосіб підвищення зносостійкості покриттів шляхом утворення міцних фазових зв'язків та зниження внутрішніх залишкових напружень.

Досліджено взаємозв'язок між структурою, міцністю та зносостійкістю композиційних матеріалів з металевою матрицею, яка утворює суцільний каркас, у якому рівномірно розподілені дисперсні тверді частинки, і показано, що тверда дисперсна фаза (ДФ) може значно підвищити зносостійкість матеріалів за рахунок розподілу зовнішнього навантаження між компонентами, процесів деформації та руйнування сполучного. Отримано розрахункові рівняння для визначення об'ємного вмісту наповнювача в найміцніших композиціях, розмірів найміцніших частинок та відстаней між ними. Встановлено залежність зносостійкості композицій від природи компонентів, розміру та об'ємного вмісту дисперсної фази.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення зносостійкості швидкозношуваних частин обладнання лісогосподарського комплексу.

Предмет дослідження: Технології електротермічної обробки композиційних покриттів для відновлення частин обладнання лісового комплексу.

Предметом дослідження є технологічний процес електротермічної обробки композиційних покриттів.

## ГЛАВА 1 СТАН ПРОБЛЕМИ

### 1.1 Композитні електрохімічні покриття (СЕР) для реабілітації лісових ділянок

Композитні матеріали все частіше застосовуються для відновлення та зміцнення частин лісогосподарських споруд [1-20].

Утворення зносостійких шарів різнорідного матеріалу на поверхні вуглецевих сталей, що використовуються для виготовлення деталей, відбувається за рахунок відділення твердих включень при їх подальшій термомеханічній, хіміко-термічній обробці або за іншими видами технологій (свердління, науглерожування, карбонітрування). та ін.) або нанесення покриттів, що містять тверді включення, скріплені пластиковою матрицею (ручне зварювання та наплавлення, газоплазмові, гальванічні та ін.) [21-28].

Найбільш ефективним, зважаючи на значні переваги перед іншими методами, є гальванічний метод одержання електрохімічних композиційних покриттів (ЕКП). СЕР поєднує в собі позитивні властивості металів з термостійкістю, хімічною стійкістю, твердістю та зносостійкістю неметалевих речовин. Гальванічний метод нанесення КЕП на деталі для відновлення і підвищення зносостійкості або зміцнення має ряд переваг: можливість регулювати склад, структуру і властивості покриттів; легкість нанесення рівномірного шару необхідної товщини; відсутність теплового впливу на деталь і покриття; можливість виключити подальшу механічну обробку; низька вартість. Процес отримання СЕР простий в управлінні, простий у регулюванні та допускає автоматизацію. Проте впровадження КЕП в практику машинобудівних і ремонтних цехів гальмується обмеженістю інформації про умови закупівлі та властивості композиційних покриттів.

Основна частина досліджень зносостійкості КЕП присвячена покриттям на основі заліза та його сплавів [34,37,44-46], нікелю [12,31], міді [49-52] і хрому. Незважаючи на те, що випробування проводилися в різних

режимах тертя і принципово різних умовах з використанням різних матеріалів в якості контртіл, всі автори показують відносну зносостійкість КЕП, яка «суттєво більша (в десятки разів)» порівняно з «чисті» покриття. Найбільшого поширення в ремонтних цехах набув метод отримання КЕП з урахуванням заліза та його сплавів [5]. Процес отримання КЕП з таких електролітів має високу продуктивність, економічну ефективність і екологічність порівняно з іншими покриттями [6]. Водночас деякі найважливіші властивості покриттів вивчені недостатньо. Міцність покриттів при розтягуванні, ударна в'язкість, внутрішнє тертя, електропровідність і модуль пружності, які відображають зв'язок між структурою і властивостями покриттів, вивчені дуже мало.

Основною метою розробки КЕП було підвищення зносостійкості частин обладнання лісогосподарського комплексу. Зносостійкість КЕП на основі заліза досліджували переважно при терті з мастилом, без мастила [6] та при підвищених температурах [7], тоді як дослідження довговічності в умовах зношування з нежорстким абразивом практично відсутні. Перші дослідження Г.В.Гур'янової, Є.М.Юдіної, Д.М.Кройтора по використанню КЕП на основі заліза для відновлення деталей обладнання лісогосподарського комплексу, що працюють в масі абразиву, показали перспективність використання покриттів для підвищення зносостійкості деталей, таких як лемеші, лапи культиватора та інші [7].

Зносостійкість КЕП залежить від природи компонентів матеріалу та їх взаємодії, розмірів ДП та об'ємного вмісту ДП у КЕП. Для того, щоб приготування композицій було доступним і контрольованим на етапі технологічного проектування матеріалу для виробництва, необхідно розробити принципи виготовлення зносостійких матеріалів, критерії вибору компонентів фаз КЕП тощо. ., пов'язуючи компоненти структури матеріалу з їх властивостями.

Для отримання зносостійкого КЕП використовуються найрізноманітніші хімічні сполуки - полімерні порошки для алмазів. У роботі

[5] наночастинки використовували для підвищення зносостійкості в умовах абразивного зношування. Така різноманітність використовуваних дисперсних частинок пояснюється тим, що на даний момент відсутні єдині критерії їх вибору за фізико-механічними властивостями, розмірами та вмістом частинок другої фази для отримання максимально зносостійких покриттів.

Водночас для формування зносостійких КЕП в умовах абразивного зношування необхідні особливі вимоги до матеріалу дисперсної фази (висока твердість і міцність; хімічна стійкість до компонентів електроліту; змочування частинок розчином; висока стійкість до агрегації та седиментації) дисперсні частинки електрокорунду та карбіду бору.

На етапі проектування для апріорної оцінки міцності КЕП часто використовуються теорії розподіленого зміцнення, згідно з якими частинки зміцнюють матрицю, стабілізують її субструктуру та обмежують кінцевий вільний пробіг дислокацій [7]. Наш досвід використання дисперсноармованих КЕП для оцінки їх міцнісних властивостей показав, що вони неприпустимі. По суті, ДП в КЕП також виступає як активна частина гетерогенного матеріалу, сприймаючи основне навантаження і розподіляючи його в матриці. Автори робіт [9, 34, 36, 37], присвячених теоретичному аналізу причин високої зносостійкості КЕП та вивченню зв'язку між їх триботехнічними властивостями та структурою і властивостями матеріалів, пов'язують оптимальний склад з міцністю матриці та здатністю утримувати частинки DF. У роботі [80] передбачається, що в залежності від умов тертя оптимальна концентрація ДВ утворюється і знаходиться на поверхні. У ряді робіт причиною називають формування сприятливого рельєфу поверхні контртіла жорсткими включеннями [9, 18]. Водночас розрахунки оптимального складу КЕП на основі заліза, в тому числі електрокорунду та карбіду бору, що відповідає найвищій зносостійкості, в літературі показують дуже широкий діапазон: оптимальний об'ємний вміст ДВ у КЕП становить 10. ..40 % (об.); оптимальний розмір частинок 1...40 мкм [9, 12].

Тому теоретичних залежностей, що визначають основні вимоги до структури та оптимального складу зносостійких КЕП, що працюють в умовах абразивного зношування, поки що не виявлено. У цьому контексті залишається дуже актуальною задача визначення оптимального складу зносостійкого КЕП та встановлення його залежності від умов експлуатації деталей.

Динамічні умови роботи деяких відновлених деталей машин КЕП можна охарактеризувати не тільки втомною міцністю та зносостійкістю. Статистика показує, що велика кількість поломок і аварій на машинах пов'язана з незатухаючими коливаннями, які пружні системи не можуть погасити. Особливу роль відіграє дисипація енергії в процесі вібрації, пов'язана з явищем резонансу. Через погані демпфіруючі властивості при виготовленні валів двигунів та інших важливих деталей багато високоміцних легованих сталей не використовувалися [2]. Наявні в літературі дані про вплив пористого хрому, срібла та олова свідчать про значний вплив покриттів на гасіння пружних коливань [4]. Водночас вплив заліза та електрохімічних композиційних покриттів на його основі практично не вивчено, незважаючи на його широке застосування в ремонтному виробництві.

Пружні властивості композитів зазвичай визначають механічними випробуваннями. Отримання таких даних часто є досить трудомістким завданням, тому розробка методів розрахунку пружних властивостей композитів є гострою потребою. Набули поширення наближені методи, точність яких недостатньо задовольняє дослідників [5-9]. Водночас питання застосування методу скінченних елементів, який дозволяє уточнити розрахунок параметрів пружності та визначити характер розподілу напружень у КЕП, ще достатньо розглянуто в літературі.

Одним із яскравих показників, що характеризують процес тертя та зношування, є шорсткість поверхні [2-4]. Тертя і зношування КЕП значною мірою визначаються субмікроструктурними властивостями. Тверді частинки

сприяють накопиченню дислокаційних петель і розсіюванню текстури, що зменшує кількість зон активної адгезійної взаємодії при терті. Розвинена в останні десятиліття теорія контакту, тертя і зношування твердих тіл дозволяє встановити зв'язок між деякими параметрами шорсткості поверхні та основними експлуатаційними властивостями [2-4].

Особливість структури композиційних покриттів (висока твердість частинок і відносно низька твердість матриці) повинна відобразитися у виробленні особливого робочого рельєфу при терті, оскільки різні за твердістю фази композицій не мають однакової стійкості до деформація та зношування [89-92]. При низькому вмісті ДФ в КЕП шорсткість визначається пружно-пластичними властивостями матриці. Якщо при великому об'ємному вмісті все навантаження сприймають тверді включення, то профіль формується за рахунок нерівностей, створених твердими включеннями, що руйнуються під навантаженням. Необхідно враховувати третій випадок утворення шорсткості КЕП, який виникає в процесі зношування, коли частинки ДФ знебарвлюються внаслідок обмеженої міцності матриці та їх недостатнього зчеплення з матрицею. Таким чином, аналіз рельєфу поверхні КЕП може бути методом визначення оптимального вмісту частинок ДФ. Однак роботи в цій сфері практично немає.

Мікротвердість матриці КЕП залежить від параметрів субмікроструктури, зміна яких в основному визначається впливом частинок дисперсної фази (ДФ) на процес гальванічного осадження металу та виділення водню [9, 12]. Априорі присутність ДФ в покритті збільшує розкид значень мікротвердості матриці, оскільки відбитки можуть потрапляти як в основу, так і в тверді включення, приховані під шаром металу. Розкид виміряного значення навколо середнього значення математично виражається коефіцієнтом варіації. Практичний інтерес представляє дослідження впливу вмісту ДФ у КЕП на коефіцієнт варіації мікротвердості матриці з метою встановлення зв'язку між ним та об'ємним вмістом ДФ у КЕП.

Утворення міцних фізико-хімічних зв'язків між частинками ДФ і

матрицею має змінити характер руйнування покриттів і покращити їх фізико-механічні властивості [9, 12]. Водночас вплив міцності зв'язку ДП і матриці на зносостійкість КЕП мало досліджено. Практично не вивчена технологія формування зв'язку ПФ з матрицею в зносостійкому покритті. Методів, що дозволяють визначити час утворення зв'язку, практично немає.

Утворення нових фаз і міцних хімічних зв'язків між компонентами композиції можливі при передачі певної кількості енергії ззовні матеріалу. Остання умова, зумовлена функціональним призначенням покриттів і, як правило, незв'язаністю поєднання кристалічних ґраток матеріалу матриці та дисперсної фази, може бути виконана різними технологічними прийомами, зокрема нагріванням деталі з покриттям, наприклад, мікрохвильовим, ЛІ та іншими способами. У разі термохімічних реакцій між компонентами неоднорідного матеріалу на поверхні деталі може виникнути новий матеріал з певними властивостями. Водночас роботи, присвячені теоретичному обґрунтуванню та практичному застосуванню електротехнічних технологій для формування зв'язку ДП із матрицею (для покращення фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів) та активації дифузійних процесів на межі розділу фаз (для отримання нових матеріалів на поверхні деталей із компонентів КЕП), вкрай недостатні або носять пошуковий характер.

## 1.2 Електротехнічні технології зносостійкої модифікації КЕП

За останні роки сфера застосування електротехнічних технологій (лазерних, мікрохвильових, плазмових, електронно-променевих та інших) у виробництві значно розширилася. У промисловості методи модифікації поверхні за допомогою таких технологій найчастіше використовують для зміцнення деталей авіації, автотракторів, обладнання лісогосподарського комплексу, обладнання хімічної, нафтохімічної, металургійної та інших галузей [2].

Електротехнології модифікації поверхні деталей застосовуються для

підвищення їх зносостійкості, термостійкості, корозійної стійкості та інших властивостей [1]. Основними перевагами методу є: можливість отримання покриття заданого складу; висока швидкість нанесення; можливість застосування деталі складної конфігурації; незалежність кінцевої товщини таких покриттів від режиму хіміко-термічної обробки та можливість їх коригування; можливість отримання покриттів на металах і сплавах, які неможливо змінити хіміко-термічними методами [3].

Модифікація гальванічних покриттів здійснюється шляхом насичення легуючими елементами та подальшої термообробки для активації фізико-хімічних процесів між наповнювачем і матрицею. Просочування покриттів легуючими елементами здійснюється в процесі електролізу (додавання солей легуючих металів, органічних сполук, дисперсних частинок) [2, 9] або подальшої хіміко-термічної обробки (азотування, цементування, борування тощо) [130-132]. Для активації фізико-хімічних реакцій використовується велика кількість різноманітних джерел: мікрохвилі, електронні промені, лазерне випромінювання (ЛВ), концентровані світлові потоки, а також нагрівання рідких теплоносіїв [133-139]. Враховуючи значні переваги, для модифікації гальванічних покриттів найчастіше використовують мікрохвильову та НВ обробку.

Інші переваги використання мікрохвильової обробки для модифікації покриття включають широке використання у виробництві та відносно низькі витрати на встановлення. Розігрів в мікрохвильовці дуже продуктивний і може бути автоматизований. До недоліків можна віднести те, що при мікрохвильовому нагріванні критичні розміри, форма і матеріал продукту. Нерівномірний зазор між індуктором і деталлю часто призводить до нерівномірного нагрівання [4-11].

Аналіз робіт з модифікації покриттів мікрохвилями показав, що можливе використання серійного виробництва обладнання з вбудованими пірометрами для термообробки [14-16]. Частота струму індуктора визначається тепловим розрахунком технологічного процесу нагріву. При

розрахунку глибину нагрітого шару встановлюють рівною товщині шару покриття, температурі поверхні і температурі на глибині прогріву. Усереднені властивості сталі можна використовувати для наближених розрахунків параметрів індуктора та глибини проникнення струму в метал [11]. Разом з тим, при розробці технології модифікації покриття мікрохвилями необхідно уточнити низку параметрів, наприклад, необхідну температуру обробки КЕП, тривалість термічного впливу та інші.

Набув поширення метод поверхневого нагріву за допомогою лазерів [7, 10, 11, 12, 17]. Більшість лазерних технологічних процесів базується на тепловому впливі лазерного випромінювання на поверхню металів [7, 11]. Процес взаємодії випромінювання з різними речовинами, в тому числі з електролітичним залізом, досліджено в роботах [7, 12-17]. За допомогою лазерного випромінювання можна контролювано нагрівати метал, проводити процеси модифікації в твердій фазі або рівномірно переплавляти тонкий поверхневий шар. Лазерний промінь можна сфокусувати в малу точку за допомогою спеціальної оптичної системи для досягнення необхідної щільності потужності випромінювання. Висока щільність лазерного випромінювання дозволяє уникнути нагріву металу на значну глибину і практично повністю запобігти деформації деталей. Крім того, велика глибина різкості лазерного променя дозволяє зміцнювати вироби неправильної форми, такі як шийки і кулачки колінчастих валів, а також розподільні вали тракторів і автомобілів, без необхідності регулювання оптичної системи [5]. Високі швидкості нагрівання і охолодження сталей з різним вмістом вуглецю допомагають отримати модифікований шар з більш високою твердістю, ніж при мікрохвильовому гартуванні. До недоліків лазерної обробки можна віднести високу вартість лазерних установок. У зв'язку з цим застосування обладнання ефективно тільки в масовому і великосерійному виробництві.

Модифікація гальванічних покриттів з використанням LY та мікрохвиль була досліджена на прикладі залізо-вуглецевого СЕР [12, 13], залізо-бору та залізо-бору карбиду [14]. Аналіз робіт з модифікації КЕП з

включенням частинок DF показує, що їх метою було покращення властивостей матриці (підвищення зносостійкості, термостійкості тощо) без збереження гетерофазності матеріалу. Як ДП використовували колоїдні (0,05...0,1 мкм) або високодисперсні (0,1...1,0 мкм) частинки. Підвищення зносостійкості в різних умовах склало 1,5-2 рази в порівнянні з «чистими» покриттями. Проте не проводились дослідження щодо модифікації КЕП дисперсними частинками діаметром 10...20 мкм, які забезпечують найвищу зносостійкість в умовах абразивного зношування. Вплив методів електромодифікації покриттів на основні фізико-механічні властивості та експлуатаційні характеристики в умовах динамічного навантаження не досліджено. Проте всі дослідження показують, що модифіковані покриття виявляють більш високу залишкову напругу [104,157].

Звідси можна зробити такі висновки: чи можлива обробка КЕП і чи призводить вона до загальної зміни структури покриття, часткового розчинення частинок DF та утворення нових хімічних сполук? дозволяє підвищити мікротвердість основи до 9...10 ДПа, що можливо за рахунок утворення карбідів і боридів заліза з високою твердістю; покриття не відшаровуються після лазерної обробки, при неповній обробці всього шару покриття міцність зчеплення на рівні «чистих» покриттів; Лазерна обробка може бути фінішною операцією, оскільки незначно змінює мікрогеометрію поверхневого шару КЕП.

### 1.3 Проблеми електричної модифікації КЕП

Найбільшу увагу проблемам взаємодії дисперсної фази і матриці в композиційних матеріалах приділено для покриттів, отриманих плазмовим процесом і спіканням матеріалів [6, 13]. Відповідно до теорії [10] утворення зв'язку між частинками ДФ і матрицею проходить у три послідовні стадії: утворення фізичного контакту між частинкою та матрицею; хімічна взаємодія матеріалів розділу фаз; об'ємна взаємодія, що супроводжується

релаксацією сил пружності.

Фізичний контакт між компонентами КЕП є найважливішою умовою, яка визначає подальшу хімічну взаємодію матеріалів матриці та ДП. Отримання компактних осадів, у яких ДП щільно оточений матрицею, залежить від типу ДП, іонного складу електроліту та його рН, умов електролізу та додавання поверхнево-активних речовин [9, 12].

Наші експериментальні дані та досвід інших дослідників показують, що утворення КЕП з диспергованими частинками легше викликається електролітами заліза. У роботах [8–10, 12–16] широко досліджені методи отримання щільних, гладких осадів із певними властивостями з добривних електролітів. Найбільш гладкі покриття виходять при використанні в якості ДП діелектриків і напівпровідників [9]. До матеріалу DF пред'являються особливі вимоги: хімічна стійкість до компонентів електроліту; частинки необхідно змочити розчином; мають високу стійкість до агрегації та седиментації. Найкраще цим вимогам відповідають електрокорозія, карбід бору, карбід кремнію та діоксид кремнію [9, 12, 32]. Одночасно необхідно дослідити вплив легуючих добавок на формування монолітного однорідного залізного осаду з ДП.

У КЕР утворення контакту між частинками DF і основним матеріалом відбувається за рахунок мікропластичної деформації, зумовленої особливостями процесу електролітичної кристалізації. Суттєвим фактором, що цьому сприяє, є тісний взаємозв'язок компонентів покриття та наявність структурних дефектів на межі розділу ДП – матриця. За суперечливими даними різних авторів, міцність зчеплення частинок з матрицею коливається від 1 до 10 МПа [9, 12, 32]. Проте апріорі можна стверджувати, що енергії процесу електрокристалізації недостатньо для утворення міцних зв'язків у гетерогенному матеріалі та активації хімічних реакцій між ДФ і матрицею. Порівняно з енергією активації більшості металів (1,35...1,65 eV) або неметалічних частинок (3,5 eV і більше) величина енергії дислокації при кристалізації металу під час електролізу становить 0,02...0,03 eV на атом.

чого недостатньо для забезпечення зв'язку ДФ з матрицею [7, 16].

В літературі особлива увага приділяється взаємодії ДП і матриці композиційних матеріалів під час буріння [164–166]. Зростання інтересу до цього процесу зумовлене можливістю отримання одно- чи багатофазних боридних шарів у приповерхневій області виробів, що характеризуються унікальним комплексом фізико-хімічних властивостей при обробці різноманітних конструкційних та інструментальних сталей і сплавів. Використання високотемпературного саморозповсюдженого синтезу для отримання порошкоподібних насичувальних середовищ дозволяє, не змінюючи загальної схеми процесу, широко варіювати вихідні компоненти металооксидного складу та отримувати насичувальні середовища різного типу, необхідної активності та гранулометричний склад в результаті. Розглянуті в літературі та в експериментальних дослідженнях фізико-хімічні аспекти утворення боридів заліза показали, що відповідальним фактором отримання того чи іншого типу боридного покриття є в основному вид речовини, що містить бориди [15]. Для отримання боридного шару на залізі та його сплавах в якості основи середовища насичення можна використовувати бор, бориди металів і карбід бору. Найбільш прийнятними для осадження ХЕП з ЕС є оксид і карбід бору [15, 16].

Натомість потребує подальшого дослідження питання структурних змін, які відбуваються під час високотемпературного нагрівання покриттів, оскільки вони суттєво визначають їхні фізико-механічні властивості та зносостійкість [9,47,83,167].

У ході реакції між компонентами КЕП можуть бути отримані сполуки, які призводять до зміни об'єму покриттів і відповідної зміни рівня їх залишкової напруги (HV) [168-170]. Вони залежать від кристалічної структури та питомого об'єму (щільності) утворених сполук, що призводить як до зменшення, так і до підвищення HV. Це особливо важливо при відновленні деталей, що працюють в умовах динамічного навантаження [171–174]. Тому необхідно враховувати об'ємні зміни покриттів при

використанні в якості ПВ сполук різної природи (наприклад, карбіду кремнію, карбіду ванадію та ін.).

## РОЗДІЛ 2. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ЗАГАЛЬНИЙ МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1. Ставте завдання

Застосування КЕП для збільшення ресурсу відновленої та нової техніки лісового комплексу є актуальним і має великий практичний інтерес. Питання теорії, вивчення властивостей КЕП, практики їх добування та застосування знайшли відображення в працях вітчизняних і зарубіжних дослідників [38-43 та ін.]. Узагальнення літературних даних дозволяє зробити висновок, що виробництво композиційних покриттів є важливим напрямком розвитку сучасної гальванотехніки, який відповідає зростаючим вимогам сучасної техніки до надійності та довговічності конструкційних матеріалів об'єктів лісового господарства.

Дослідники, які розробляють зносостійкі КЕП, керуються теоріями, які недостатньо враховують фізико-хімічні аспекти взаємодії матеріалів матриці та ДП у формуванні загальної міцності та зносостійкості матеріалів [6]. При цьому властивості КЕП залежать не тільки від фізико-хімічних властивостей компонентів, а й від міцності зв'язку між ними [9,12]. Максимальна міцність і зносостійкість КЕП досягається при утворенні міцного хімічного зв'язку на межі розділу матриця - наповнювач, що може бути забезпечено термічним впливом на поверхню деталі, наприклад, за допомогою мікрохвиль або ЛВ [18]. Водночас термічний вплив може призвести до зміни як фізико-механічних властивостей покриттів, так і їх загальної гетерогенної структури (розчинення дисперсної фази в матриці з утворенням нових фаз), що порушує основний принцип зношування. формування опору – правило Шарпі [16]. Однак у відомих нам дослідженнях ці аспекти модифікації покриття не враховувалися.

В якості одного з головних достоїнств СЕР всі дослідники називають значне (десятикратне) підвищення зносостійкості і міцності. Проте на

сьогоднішній день не доведено залежність зносостійкості та міцності КЕП від структурних властивостей його компонентів [9,12,46–48]. Робота різнорідних матеріалів, що входять до складу композиту, призводить до ефекту, еквівалентного створенню нового матеріалу, властивості якого відрізняються від властивостей кожного з його компонентів. При цьому основні вимоги до структури та фізико-механічних властивостей матеріалів, що використовуються для їх створення, не визначені. Дослідники, які розробляють зносостійкі СЕР, повинні керуватися лише теоріями розподіленого зміцнення матеріалів. Однак у даному випадку ці теорії є неприйнятними, оскільки функціональні властивості і призначення ДП індисперсноармованого та зносостійкого КЕП різні. Розміри частинок DF, що використовуються для отримання СЕР, коливаються від нанорозмірів до 100 мкм [32-36]. Для їх виробництва використовуються найрізноманітніші хімічні сполуки – від полімерних порошків до дисульфиду молібдену до алмазів.

Для вирішення проблеми підвищення якості матриці КЕП розроблено різні технологічні прийоми [46–48]. Проте їх можливості розкриті недостатньо через обмеженість досліджень зв'язку між умовами впливу на оброблену поверхню та фізико-механічними властивостями покриттів, з яких «випали» структурні аспекти проблеми. Більшою мірою на прикладі електролітичного чавуну розкрито питання визначення та аналізу прямої залежності механічних властивостей від дислокаційної структури виділень, отриманих за різних умов електролізу та інших видів обробки покриттів [16, 30, 37- 44]. Властивості залізних покриттів пояснюються особливостями їх будови, які виникають внаслідок пластичної деформації двійниками, у процесі електрокристалізації, випадання при електролізі та фіксації структурних дефектів сторонніми частинками (частками водню, гідроксиду та інші). Реалізація природних можливостей зміцнення «чистого» заліза та його сплавів за допомогою його пластичної деформації до граничного стану та руйнування дозволяє досягти найвищої зносостійкості електролітичних

покриттів на рівні загартованої сталі від 45 до твердість 4,5 ...5,5 ГПа. Переконсолідовані і зруйновані тертям і зношуванням відкладення інтенсивно розсіюються з поверхні за рахунок утворення і злиття субмікротріщин, що утворюються при формуванні покриття. Для усунення протиріччя між широкими технологічними можливостями електрохімічного способу відновлення і зміцнення деталей і обмеженою сферою раціонального застосування осаджень заліза необхідний пошук нових технологічних прийомів і способів підвищення їх якості та зносостійкості.

Структурно-чутливі властивості металів представляють значний інтерес для аналізу та контролю змін їх структури в процесі модифікації [19]. До них відносяться електрофізичні властивості: електричний опір і термоЕРС, з одного боку, створюють покриття з різними властивостями, а з іншого боку, дозволяють вивчати і контролювати процес їх зміни при різних видах обробки (наприклад, за допомогою мікрохвиль, лазерів і ін.). інші методи). Представляє інтерес визначення зв'язку цих властивостей з фазовими і структурними перетвореннями при термічній обробці.

Вивчення впливу технологій електромодифікації на продуктивність КЕП на прикладі мікрохвильового та низьковольтного нагріву та вибір оптимального поєднання структури та складу покриттів дозволяє розробити технологічний процес електромодифікації покриттів деталей машин. Проте остаточним критерієм вибору технологічних параметрів процесу можуть бути лише експлуатаційні випробування деталей з покриттями.

**Мета роботи.** Удосконалення технології КЕП та розробка теоретичних основ їх електротермічної обробки для відновлення частин обладнання лісогосподарського комплексу.

Відповідно до мети були сформульовані такі робочі завдання:

– Визначення напряму розвитку технології відновлення та підвищення довговічності частин обладнання лісогосподарського комплексу із зносостійкими КЕП на основі аналізу наукових досягнень у галузі технічної експлуатації машин і обладнання;

- розробити теоретичні основи електротермічної обробки КЕП;
- Дослідження особливостей впливу електротермічної обробки КЕП на їх структуру, основні фізико-механічні властивості та підвищення оброблюваності в умовах абразивного зношування;
- Удосконалення існуючих, розробка та впровадження нових технологічних прийомів відновлення та підвищення довговічності швидкозношуваних частин обладнання лісогосподарського комплексу з модифікованими КЕП, проведення їх техніко-економічного обґрунтування.

## 2.2. Загальна методологія дослідження

Для вирішення поставлених у роботі завдань був прийнятий наступний алгоритм дослідження (рис. 2.1).

Система покриття зразків включала електролізери, джерело живлення, термостат, пристрої для регулювання та контролю параметрів електролізу (рис. 2.2). Як джерело живлення використовувалися випрямлячі типу БСА-6А і ВАК-600 (12/6). Розчин точно нагрівали і температуру стабілізували за допомогою термостата У-7. Вміст кислоти контролювали за допомогою іонометра ЕВ-74. Анодне оброблення зразків і деталей проводили в 30% розчині сірчаної кислоти при густині струму 70...75 А/дм<sup>2</sup> і температурі 18...23 С протягом 80...90 секунд. Схеми лікування призначали згідно з рекомендаціями літератури [9,29,47].

В якості основного електроліту для внесення добрив обрано розчин хлорного заліза ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  – 500 г/л) – один із найпродуктивніших і найбільш часто використовуваних на практиці [9,15,16 та ін.].

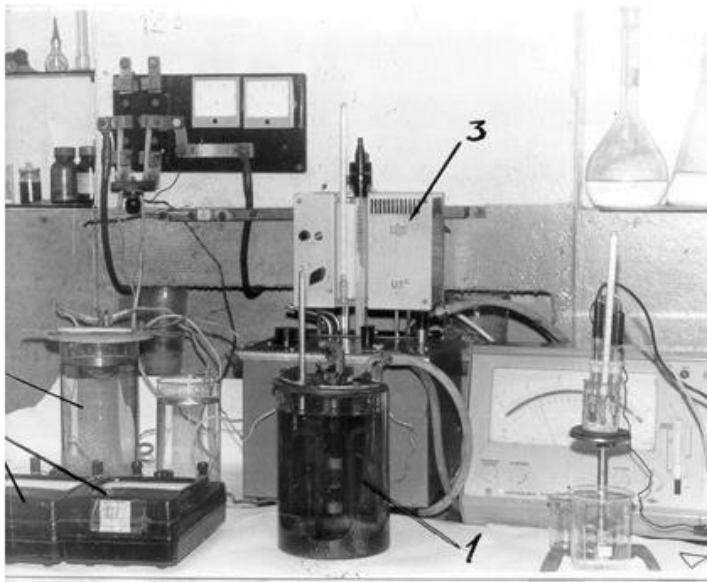
Зразки для дослідження впливу «чистого» електролітичного заліза та його сплавів на механічні властивості відбирали в скляний циліндр місткістю 3 дм<sup>3</sup> (рис. 2.2). При нанесенні композитних покриттів використовувалася спеціальна ванна об'ємом 5 дм<sup>3</sup>.

Конструкція ванни з увігнутим дном і перегородкою, що відділяє пропелерну мішалку від зони розташування електродів, дозволила створити висхідний потік з рівномірним розподілом частинок по об'єму електроліту. Потік ЕК до робочої частини ванни здійснювався через перфороване дно – седатив. Для регулювання витрати розроблений і встановлений в окремій секції витратомір з манометром перепаду тиску (5) типу Вентурі. Ванна, перфороване дно – перегородка і всі частини витратоміра виготовлені з вініпласту, який після складання оброблений 30% розчином сірчаної кислоти для виключення виділення компонентів матеріалу в процесі електролізу. Струминне перемішування здійснювали за допомогою пропелерної мішалки (4), виготовленої на базі мішалки МЛТ-3 з плавним регулюванням швидкості приводу, встановленої в окремій секції.



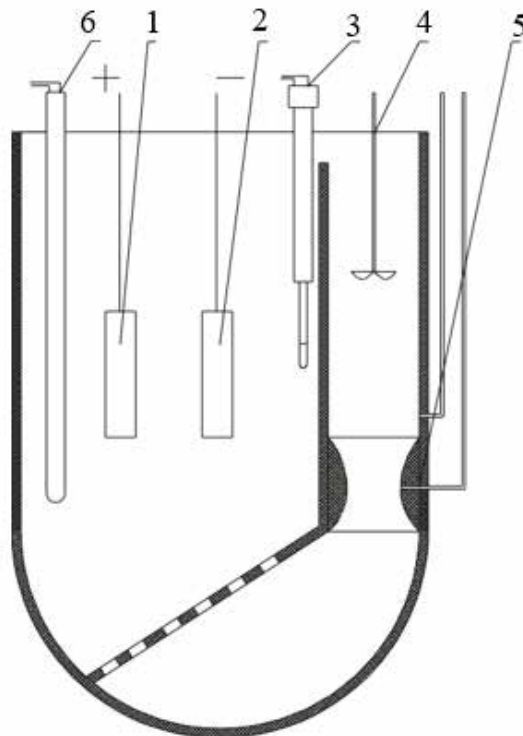
Рейс. 2.1 – Алгоритм дослідження

Виготовлення лопатей гвинта мішалки з низьковуглецевої сталі дозволяє виключити накопичення іонів  $Fe^{3+}$  в електроліті. Швидкість потоку ЕС встановлювалася на основі рекомендацій [46]. Рівномірність вмісту DF в ЕК контролювали ваговим аналізом проб, відібраних при встановлених температурах ванни.



- 1-ванна залізнення;
- 2-ванна анодної обробки;
- 3-термостат;
- 4-прилади для контролю електричних параметрів

Рис. 2.2 – Випробувальна установка для зразків покриття



- 1 - Анод;
- 2 - катод;
- 3 - термометр;
- 4 - мішалка;
- 5 - витратомір Вентурі;
- 6-контактний нагрівач

Рис. 2.3 – Пристрій для застосування КЕП з керованою гідродинамікою потоку

Для дослідження впливу легуючих і буферних добавок на властивості покриттів одержували електролітичні сплави шляхом введення в основний електроліт солей заліза нікелю ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ГОСТ 4465-74,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ГОСТ 4038-79), кобальту ( $\text{CoSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  ГОСТ 4525-77), алюміній ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  ГОСТ 3758-75) і натрію ( $\text{Na}_2\text{H}_4\text{C}_4\text{O}_6 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  ГОСТ 22280-76). Кислотність розчинів підтримували додаванням соляної кислоти розведеної 1:5 (ГОСТ 3118-77). Електролітну суспензію готували введенням електролітів із мікропорошків білого електрокорунду (марки М2, М10, М14, М20, М40), карбіду бору (М7, М10, М20), карбіду кремнію (М14) та оксиду кремнію (М14). Вміст порошку коливався від 25 до 150 кг/м<sup>3</sup>. Після застосування КЕР стабілізувався протягом 10 хвилин. 20 днів зберігання. Попередню обробку мікропорошків перед введенням електроліту не проводили, суспензію необхідної маси порошку змішували з невеликою кількістю розчину в окремій ємності до повного змочування частинок і доведення рН до робочого значення. Потім їх вносили в електроліт невеликими порціями при постійному перемішуванні. Робочий розчин перемішували протягом 0,5 години, потім знову перевіряли склад і регулювали рН. У всіх дослідах режим змішування підтримували постійним. Положення катодів відносно анодів і стінок електролізера суворо контролювалося спеціальними приладами.

Електроліти готували з реактивів кваліфікації «ЧХ» і «ЧДА», доводили за концентрацією компонентів і рН додаванням відповідних кислот і солей. Склад електролітів підтримували в межах 1 г/л і контролювали кількісним хімічним аналізом за стандартною методикою.

НВЧ термообробку проводили на установці типу ІЗ-250-66. Температуру нагрівання (Т, від 200 °С до 1200 °С) контролювали пірометрично. Чи проводилася обробка на установці «FRUMPF» L2530. Інтенсивність термічної обробки змінювалася потужністю, швидкістю переміщення точки нагріву та відстанню між паралельними доріжками. У всіх експериментах частота імпульсів і діаметр лазерного променя були

постійними. Режими лазерної обробки зразків з КЕП включали нагрівання без розплавлення покриття (м'який режим), з частковим розплавленням покриття (жорсткий) і повне переплавлення покриття та підкладки (дуже твердий). Температуру поверхні зразків під час обробки визначали розрахунковим методом [9].

У роботі експериментальними методами досліджено морфологію, структуру і текстуру покриттів і матриць КЕП: склад покриттів – методом стереометричного металографічного аналізу [17]; металографічний аналіз на мікроскопах МБС-9, МІМ-8; рентгенологічне дослідження на апараті ДРОН-3М; електронна мікроскопія на СЕМ –Fesla BC-300”, профілактика на апараті –MarSurf PS1”.

При дослідженні електрофізичних властивостей покриттів визначали їх щільність, термоЕРС та електричний опір (чотириконтактна схема з використанням одинарного мосту Р333) [49,169,175].

Основними механічними методами дослідження властивостей покриттів були: вимірювання мікротвердості, пружних властивостей (метод динамічного резонансу) [4, 18], внутрішніх напружень (метод гнучкого катода) [49], міцності зчеплення (метод кільця) [29, 37], міцність покриття при розтягуванні (метод відривання кільця від матеріалу покриття), демпфуюча здатність (метод вимірювання логарифмічного декременту демпфування) поперечні коливання кантилеверних зразків), ударна в'язкість. Зносостійкість покриттів досліджували за схемою ролик-подушка (ГОСТ 23208-79). Фазові та хімічні перетворення в КЕП досліджували методами рентгенофазового аналізу [13], диференціального термічного та термографічного аналізу (за допомогою дериватографа МОМ) [15], контролю термоЕРС та електроопору [18].

### 2.3 Спеціальні методи дослідження властивостей КЕП

Однією з найактуальніших проблем забезпечення якості та надійності

технології нанесення КЕП є контроль складу, фізико-механічних та експлуатаційних властивостей матеріалу покриття на основі непрямих вимірювань [9]. Перш за все, це пов'язано з розробкою методів і технічних засобів вимірювань і обчислень, які дозволяють оперативно отримувати необхідний обсяг інформації. Розв'язанню даної проблеми присвячено даний розділ магістерської роботи, в якому запропоновано нові методи: визначення субмікроструктури матриці КЕП за її дилатацією, визначення вмісту ДФ в покритті за дисперсією мікротвердості, оптимізація зносостійкості. КЕП на основі отриманої шорсткості та метод апріорної оцінки пружних властивостей [22, 41]. Мікротвердість матриці КЕП залежить від параметрів субмікроструктури, зміна яких в основному визначається впливом частинок дисперсної фази (ДФ) на процес гальванічного осадження металу та виділення водню [9, 12]. Апріорі присутність DF в покритті збільшує розкид значень мікротвердості матриці, оскільки відбитки можуть потрапляти як в основу, так і в тверді включення, приховані під шаром металу. Дисперсія вимірюваного значення навколо середнього математично виражається коефіцієнтом варіації [19]. Практичний інтерес представляє дослідження впливу вмісту DF у КЕП на коефіцієнт варіації мікротвердості матриці з метою встановлення зв'язку між ним та об'ємним вмістом DF у КЕП.

Приступаючи до аналізу умов утворення та утворення дефектів у структурі електролітичних чавунних покриттів з метою встановлення закономірностей зміни механічних властивостей, немає сенсу докладно описувати всі виявлені в них дефекти в роботах [9, 19]. Будь-які порушення розташування атомів у ґратках (структурні дефекти) точкових, одновимірних, а також тривимірних дефектів (наприклад, мікропор), які за визначенням відносяться до мікроструктури і не потребують аналізу на атомарному рівні, неминуче призводять до розтягування і змін металу. На нашу думку, при розгляді цього питання для оцінки загальної ефективності матеріалів дилатація може бути одним із параметрів, що характеризують субмікроструктуру покриттів, що підлягають обробці.

Висока зносостійкість КЕП обумовлена тим, що тверді частинки, що утворюються при зношуванні об м'яку матрицю, є зонами контакту, які піддаються найбільшому навантаженню при терті. Завдяки своїм високим фізико-механічним властивостям вони запобігають злипанню та схопленню металевих поверхонь, а при недостатньому подачі пари сприяють кращому розподілу мастила по робочій поверхні протилежностей. Відповідно до моделей класичної втомної теорії міцності, «пелюсткової» теорії зношування, термофлуктуаційної теорії С.М. Журкової та В.Р.Регеля, адгезиву Е.Арчарда та Е.Хорнбогена, енергії тертя Г.Флейшера та Г.Грегора є обумовлені сукупністю властивостей матричних матеріалів і частинок, їх поверхневої енергії, структурних особливостей і зовнішніх умов [19]. При розподіленому навантаженні напруження в приповерхневому шарі матеріалу матриці значно менші, ніж у приповерхневому шарі твердих включень. Це пояснюється тим, що рівномірно розподілене навантаження однаково деформує як матрицю, так і включення. Однак, оскільки модуль пружності матриці нижчий, ніж модуль пружності включень, то напруги в матриці відповідно менші [15]. Таким чином, аналіз умов підвищення зносостійкості «чистих» покриттів і КЕП за різних умов випробувань показав, що триботехнічні властивості найбільшою мірою пов'язані з міцністю взаємодіючих різнорідних матеріалів, що входять до складу. Водночас у ряді робіт причиною називають формування сприятливого рельєфу поверхні контртіла твердими включеннями [8, 14].

Пружні властивості композитів зазвичай визначають механічними випробуваннями. Отримання таких даних часто є досить трудомістким завданням, тому розробка методів розрахунку пружних властивостей композитів є гострою потребою. Теоретичні оцінки пружних властивостей композитів з розподіленими включеннями розглядалися в ряді робіт [6, 17]. Значного поширення набули наближені методи («правило сумішей», енергетичний метод, метод Релея та ін.), точність яких недостатньо задовольняє дослідників.

### 2.3.1 Визначення об'ємного вмісту дисперсної фази в композиті методом мікротвердості

Якщо виходити з відомої моделі сферичної півплощини, що розширюється, утвореної під відбитком діаметром  $d_H$ , то лінії однакої твердості та інтенсивності деформацій (ізостати) являють собою сімейства напівсферичних поверхонь із спільним центром на перетині осі відбитка з вихідною поверхнею зразка (рис. 9). У зоні відбитка може перебувати тверда частинка заданого діаметра  $d_f$ , просторові координати якої характеризуються діаметром ізостата  $D_{Hf}$ . Її поверхня проходить через центр фази в будь-якому відносному розташуванні фази і відбитка. Вплив фазової просторової координати залежить від градієнта напружень і деформацій під відбитком. Для оцінки цього градієнта прирівнюємо мікротвердість до питомої роботи деформації  $A$  під час стиснення [199].

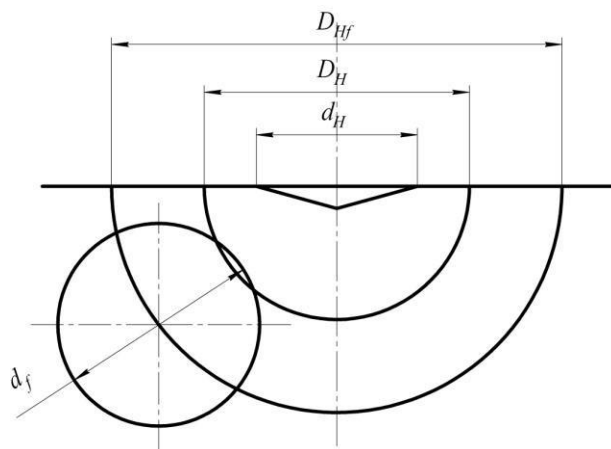


Рис. 2.4 – Характерні розміри твердих частинок DF та відбиток індентора для опису моделі

Робота  $A$  пов'язана з напругою  $\sigma$ , еквівалентною мікротвердості  $H_\mu$ , та її ефективними деформаціями під тисненням відомим інтегралом

$$A = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (2.1)$$

Де відносна деформація  $\varepsilon$

Модель напівпорожнини дозволяє припустити, що ця робота зменшується зі збільшенням діаметра ізостата  $DH$  за статичним законом  $(dH/DH)^m$ , який визначає характер зміни мікротвердості під впливом фази, що знаходиться в відбитку. зона [198, 199]. Очевидно, що для всіх значень  $t$  виконується нерівність  $DH_f > DH > (DH_f - df)$ . Ця нерівність виникає внаслідок суперпозиції впливу фактора адитивності  $H_\mu$  на мікротвердість структурно неоднорідного матеріалу та закону зменшення статичної роботи  $A$ . Якщо протилежний вплив цих двох факторів повністю компенсовано, то в інтервалі  $DH_f \square DH > (DH_f - df)$  вплив фазової зміни мікротвердості  $H_\mu$  постійний. Таким чином, це можна записати:  $DH = DH_f - df +$ , де шукане значення пропорційне розміру сліду за умов нормалізації, визначених у статичному законі. Значення можна оцінити з граничних умов. У граничному випадку, коли діаметр  $dH$  малий і тому на достатній відстані від твердого включення, наявність  $DF$  не впливає на значення вимірної мікротвердості і дорівнює мікротвердості матриці. Зі збільшенням навантаження на індентор настає момент, коли  $dH = DH \cdot f$ . Якщо фаза знаходиться в області осі депресії, час виявленого максимуму все ще  $DH = dH$ . В іншому граничному випадку фаза досягає поверхні  $df/DH_f = 1$ , вимірюється твердість фази  $H_f$ .  $\Delta\Delta\Delta$

Беручи до уваги наведені вище міркування, можна припустити, як перше наближення, що  $=dH (df/DH_f)$ . Тоді зміни мікротвердості  $H_\mu$  під впливом двох розглянутих геометричних факторів отримують наступний вираз  $\Delta$

$$\square H \square \sim \text{Див. } (df/DH_f)^2 (dH/DH)^m. \quad (2.2)$$

отримуємо вираз для сумарної мікротвердості КЕП, який задовольняє задані граничні умови:

$$H_\mu \sim H_{\mu m} + (H_{\mu f} - H_{\mu m}) (C_f (d_f/D_{Hf})^2 (d_H/D_H)^m), \quad (2.3)$$

Якщо розглядати два випадки вимірювання мікротвердості, в одному з яких під відбитком немає  $DF$  частинки, а в іншому виявлено частинку з діаметром  $df$ , то коефіцієнт варіації  $(\square)$  визначається виразом:  $\vartheta$

$$\vartheta = \frac{H_{\mu f} - H_{\mu t}}{H_{\mu f} + H_{\mu t}} \quad (2,4)$$

Для рівномірно розподілених в об'ємі частинок DF залежність коефіцієнта варіації мікротвердості від розміру вдавлення та його положення (якщо  $df/DHf = \text{const}$ ) набуває вигляду, зображеного на рис. 2.5. Залежно від діаметра вдавлення (навантаження індентора) коефіцієнт варіації зростає і пропорційний діаметру частинки. Взнявши за одиницю середню відстань між частинками, розташованими в гексагональній ґратці, об'ємний вміст визначається виразом [9]:

$$V_{\text{ДФ}} = 0,7405 d_f^3.$$

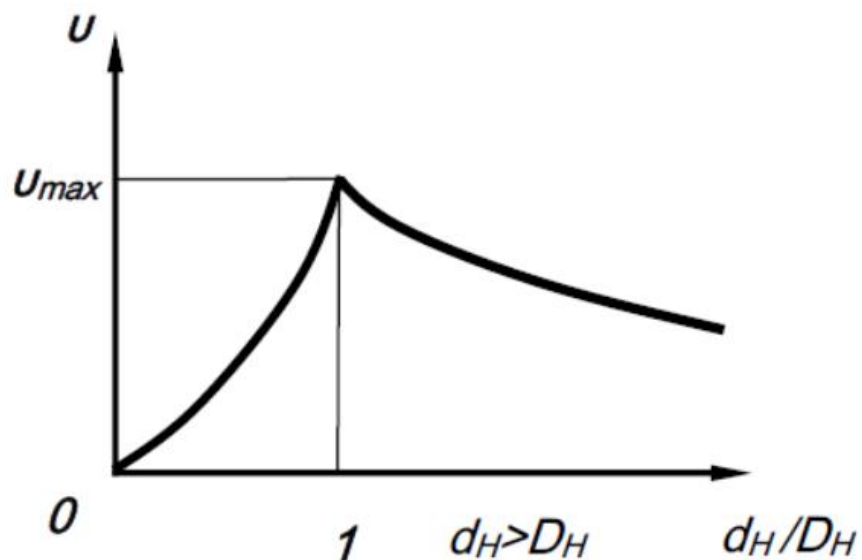


Рис. 2.5 – Залежність коефіцієнта варіації від розміру відбитка та відстані між частинками DF, коли  $df/DHf = \text{const}$

Звідси випливає, що максимальне значення коефіцієнта варіації мікротвердості пропорційне об'ємному вмісту ДФ у КЕП:

$$d_f/D_{Hf} \sim V_{\text{ДФ}}^{1/3}.$$

При визначенні емпіричної залежності між об'ємним вмістом DF у КЕП ( $V_{\text{ДФ}}$ , % об.) та коефіцієнтом варіації мікротвердості ( $\nu$ , %) залізо-нікель-електрокорундове покриття, отримане залізо-нікель-

електрокорундовим покриттям ( Використовувався порошок М14) авторів у роботі [46]. У дослідженні використовувалися зразки сталі 35 з покриттям товщиною 0,5-0,1 мм. Об'ємний вміст ДФ у КЕП визначали на мікрошліфі методом кількісної стереометричної металографії.

$$v = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{\mu i} - H_{\mu ср})^2}}{\sqrt{n-1} \cdot H_{\mu ср}} \times 100\%,$$

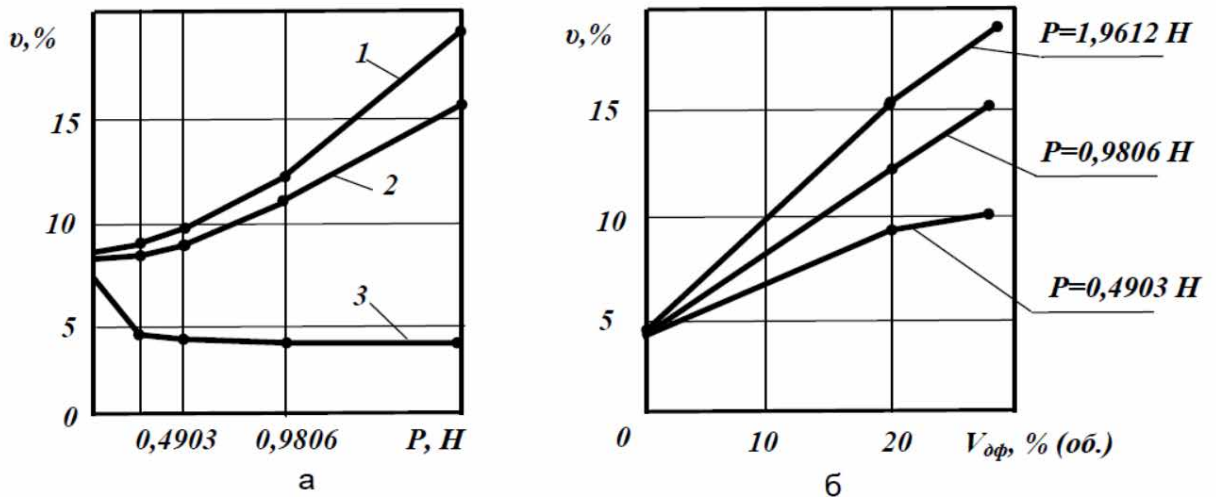
де  $H_{\mu i}$ , при  $i=1, 2, \dots, n$  – значення мікротвердості при  $i$ -му вимірюванні;  $H_{\mu ср}$  – середнє значення мікротвердості. Для «чистих» гальванічних покриттів значення  $v$  для різних відбитків мінімальні (рис. 2.6, а). Очевидно, що для «чистого» електролітичного заліза зміна мікротвердості залежно від глибини проникнення індентора залежить головним чином від типу підготовки поверхні зразків. При «великій» глибині проникнення алмазної піраміди (навантаження на індентор 0,9806 Н (100 гс) і більше) мікротвердість залежить від величини прикладеного навантаження (див. рис. 2.5, а).

При вдавлюванні індентора в метал через високу концентрацію напруг під вістрям алмазної піраміди поширення дислокацій по всіх можливих системах ковзання і подальше зміцнення відбувається майже одночасно.

Враховуючи, що рухливість дислокацій біля поверхні вища за об'єм металу, то початкові етапи деформації при мікроіндентуванні мають характеризуватися підвищеною швидкістю деформації та ступенем наклепу металу під індентором. Це означає, що чим менше навантаження, тим більша результуюча міцність матеріалу в зоні відбитка, що проявляється у збільшенні коефіцієнта варіації мікротвердості (рис. 2.6,а) і сумарного значення мікротвердості матеріалу. Виходячи з уявлень про субмікроструктуру порушеного шару при механічній обробці, можна припустити, що екстремуми на кривій мікротвердості залежно від глибини проникнення індентора відповідають, у першому наближенні, межі підшарів і індентора. Глибина проплавлення, при якій мікротвердість не змінюється, відповідає загальній глибині. Про це йдеться в літературі з дослідження

глибини порушеного шару різними методами [7].

Наявність ДФ у КЕП призводила до збільшення розкиду мікротвердості (рис. 2.6 а). Мінімальне значення коефіцієнта варіації мікротвердості для різного об'ємного вмісту ДП у покритті спостерігалось при мінімальному навантаженні індентора (рис. 2.6, а). Зі збільшенням навантаження залежність між  $V_{df}$  і  $v$  ставала більш очевидною (рис. 2.6, б).



1 –  $V_{df}=28,4\%(об.)$ ; 2 –  $V_{df}=20,2\%(об.)$ ; 3 –  $V_{df}=0$

Рисунок 2.6 – Залежність коефіцієнта варіації мікротвердості:

а) від навантаження індентора P; б) від вмісту ДФ у КЕП

Зміна коефіцієнта варіації (при збільшенні об'ємного вмісту ДВ у КЕП ( $V_{df}$ , %(Об.)) від мінімального значення до 28...30 % (Об.) залежно від навантаження на індентора можна описати різними рівняннями регресії другого порядку, отриманими на основі статистичної обробки експериментальних даних:

$$\text{при } P=0,4903 \text{ Н и } 4,8\% < v < 10\%, \quad V_{df} = 0,438 v^2 - 2,129 v + 4,8; \quad (2.8)$$

$$\text{при } P=0,9806 \text{ Н и } 4,8\% < v < 15\%, \quad V_{df} = 0,141 v^2 - 0,619 v + 4,8; \quad (2.9)$$

$$\text{при } P=1,9612 \text{ Н и } 4,8\% < v < 18\%, \quad V_{df} = 0,103 v^2 - 0,595 v + 4,8. \quad (2.10)$$

Використовуючи залежності (2.8)–(2.10) та рис. 2.6, значення коефіцієнта варіації мікротвердості КЕП при однакових навантаженнях на індентор дає змогу оцінити об'ємний вміст DF.

Отримана узгодженість експериментальних і розрахункових даних виражається в тому, що збільшення об'ємного вмісту частинок у КЕП призводить до збільшення розкиду виміряного значення мікротвердості. Наявність кореляційного зв'язку між коефіцієнтом варіації мікротвердості та об'ємним вмістом дозволяє оцінити вміст DF у покритті.

## **РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ТА ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗКУПОЧОК**

Композитні електрохімічні покриття (композити, композити) — гетерогенні багатокомпонентні матеріали, що являють собою об'ємну комбінацію різноманітних компонентів, з яких можуть бути виділені сполучна (основа — електролітичне покриття) і наповнювач (дисперсні частинки, волокна тощо). ), які мають властивості, яких не мають окремі вихідні компоненти. Зносостійкі КЕП одержують з ЕС в процесі гетероадифікації частинок ДФ на катоді з подальшим заростанням електролітично нанесеним залізом [9,12,32,33-36]. Тому в КЕП утворення контакту між частинками ДФ і матеріалом основи відбувається за рахунок мікропластичної деформації, зумовленої особливостями процесу електролітичної кристалізації [9, 12]. Утворення нових фаз і міцних хімічних зв'язків між компонентами композиту можливі при підведенні до них ззовні певної кількості енергії при нагріванні різними методами. Енергія активації хімічної взаємодії залежить від природи та енергетичної насиченості взаємодіючих матеріалів. Енергонасиченість і незбалансованість структури матеріалів, отриманих електролітичними методами, можуть призвести до зміни температури активації фазових взаємодій. При отриманні КЕП цьому питанню не приділено належної уваги. Тому для дослідження впливу природи ДФ на фізико-хімічні процеси необхідно розглянути деякі структурно-фазові зміни КЕП в умовах високотемпературного нагрівання.

### **3.1 питання дослідження**

Аналіз умов підвищення зносостійкості КЕП за різних умов показав, що їх триботехнічні властивості тісно пов'язані з міцністю взаємодіючих різнорідних матеріалів, з яких складається композит [9,12]. Функціональне призначення в'язучого КЕП – утримувати зерна ДФ в композиті та завдяки

високій пластичності та в'язкості розслаблювати навантаження, забезпечуючи таким чином максимальний опір крихкому руйнуванню КЕП при терті. Сполучна також повинна мати достатню міцність, щоб забезпечити максимальну зносостійкість. Металева матриця повинна бути суцільним каркасом, який утримує частинки DF від фарбування. В якості основи КЕП найчастіше використовували «чисте» електролітичне залізо. Електролітичні чавунні покриття за твердістю і зносостійкістю подібні до загартованої середньовуглецевої сталі. Поліпшення його властивостей можливе за рахунок леگوутворення або за рахунок повної зміни властивостей покриттів, які вони отримують у процесі електроосадження і подальшої термомеханічної або хіміко-термічної обробки (свердління, науглерожування, карбонітрування, та ін.) [9, 20-23]. Під час електролізу осажені шари заліза набувають специфічних властивостей, зумовлених їх особливою структурою [48-50]. Проте в дослідженнях властивості електролітичного заліза та сплавів на його основі зазвичай пов'язують з умовами вилучення осаду, а не з особливостями його структури, що ускладнює вибір оптимальних умов електролізу для отримання високоякісних осаду. [9,12]. У літературі зібрано велику кількість залежностей мікротвердості, внутрішньої напруги, міцності зв'язку, крихкості, зносостійкості та інших властивостей виділень і деталей з покриттями від щільності струму, рН, температури і складу електроліту. Паралельно в ряді робіт параметри субмікроструктури і мікроструктури визначали з тих же параметрів, які, однак, не пов'язані між собою. Водночас, як показує огляд робіт (див. розділ 1), зв'язок між фізико-механічними властивостями та структурою опадів детально не вивчений [36].

Не менш важливу роль у підвищенні зносостійкості повинна грати міцність зв'язку між матрицею і наповнювачем. Крім того, суттєву роль у роботі КЕП має відігравати сила взаємодії між компонентами композиту, оскільки зношування поверхні в пружному та пластичному контакті пропорційне контурному тиску, який залежить від фактичної площі контакту

між ДФ частинки та матриці. У ряді робіт причиною називають формування сприятливого рельєфу поверхні контртіла жорсткими включеннями [30]. Однак, як це може вплинути на зносостійкість, серйозно не досліджено.

Тому питаннями теоретичного дослідження були:

- встановити зв'язок між структурою та властивостями опадостійкості з дилатацією як невід'ємною ознакою руйнування матеріалу;
- визначити зв'язок між міцнісними властивостями та зносостійкістю КЕП залежно від міцнісних властивостей компонентів та їх взаємодії;
- Дослідити можливість утворення зв'язків між ДФ і матрицею внаслідок активації хімічних взаємодій між матрицею і ДФ, а також вплив структурно-фазових змін КЕП в умовах високотемпературного нагрівання на їх міцнісні властивості.

Вирішення цих завдань дозволить визначити способи поліпшення властивостей покриттів, розробити технологічні прийоми поліпшення властивостей КЕП, які не здорожують загальну технологію, а також використовувати найбільш поширене обладнання, що дозволяє використовувати його в умови роботи ремонтних майстерень.

### **3.2 Зв'язок між міцнісними властивостями електролітичних осадів та їх будовою**

Розглянемо залежність міцності матриці КЕП від її структури, яка формується в процесі електроосадження. Теорія наклепу вказує на два основних напрямки підвищення міцнісних властивостей металів шляхом зміни структури [100,101,206]:

- Збільшення щільності дефектів кристалічної решітки (точкових, лінійних, площинних та інших) (рис. 3.1, II);
- Зменшення щільності дефектів у кристалічній решітці металу, наприклад, шляхом керування процесами кристалізації металів високої чистоти, що дозволяє вирощувати монокристали бездефектної або майже

ідеальної структури (моноволокна, вуса) (рис. 3.1). , я).

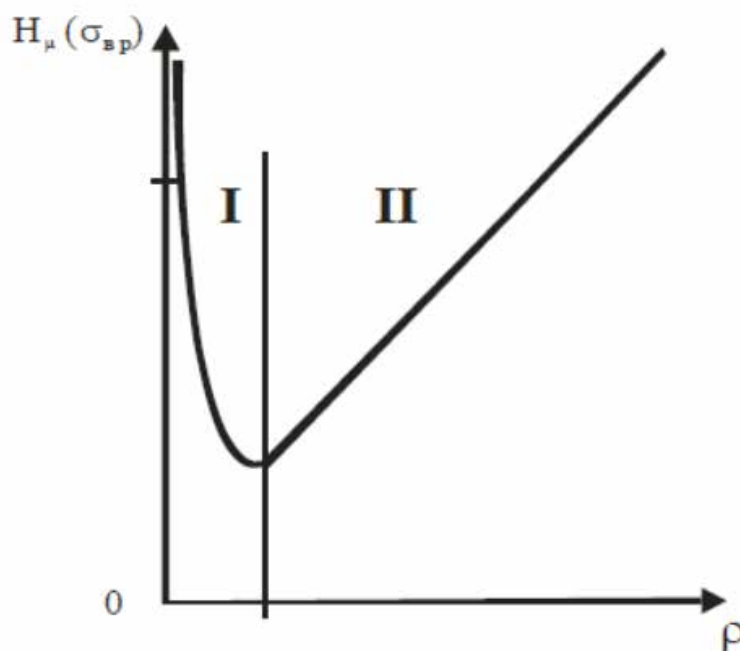


Рисунок 3.1 – Залежність міцнісних властивостей «чистих» металів від щільності дефектів кристалічної структури (I і II – зони зменшення або збільшення дефектності кристалічної структури)

Перший напрямок, пов'язаний з різними комбінованими впливами (механіко-термічними, термохімічними) на структуру металу, в даний час набув найбільшого поширення. Підвищення міцності і зносостійкості «чистих» металів відбувається за рахунок збільшення кількості дефектів і опору їх руху. У той же час збільшення щільності структурних дефектів обмежується можливістю їх екстремального накопичення матеріалом і переходу в неявно кристалічний стан, в якому щільність металу близька до його щільності в розплавленому стані. При подальшому збільшенні щільності дефектів структури матеріалу відбувається його зміцнення (руйнування) з утворенням решітки субмікротріщин (тріщин). Його щільність стає меншою за щільність рідкого металу. У ряді методів зміцнення при використанні жорстких видів обробки відбувається перехід матеріалу в граничний стан (незміцнений). На жаль, межі між зміцненням і зміцненням матеріалів чітко не визначені. Тому в рекомендаціях практично

немає обмежень щодо способів армування, які необхідно встановити.

Якщо з метою встановлення закономірностей зміни механічних властивостей почати аналізувати умови утворення та утворення дефектів у структурі електролітичних чавунних покриттів, то немає сенсу докладно описувати всі виявлені в них дефекти в праці [9,100,206 та ін.]. Будь-які порушення розташування атомів в решітках (структурні дефекти), точкові, одновимірні, двовимірні, а також тривимірні дефекти (наприклад, мікропори), які за визначенням відносяться до мікроструктури і не потребують аналізу. на атомному рівні неминуче призводять до розширення та змін у металі. Для оцінки загальної дефектності матеріалів, на нашу думку, при розгляді даного питання одним із параметрів, що характеризує основу покриттів, що підлягають обробці, є дилатація.

Теоретична міцність чавуну становить 70 МПа [9]. Структурні дефекти змінюють його. Як показано в розділі 2, розширення може бути інтегральним показником структурної досконалості електролітичного заліза та його міцності. Тому цікаво простежити, як змінюється тонка структура і щільність покриттів за різних умов електролізу. Електролітичне залізо має високий ступінь хімічної чистоти. Тому зміна його щільності може бути в основному зумовлена процесом деформації осаду при електроосаженні, його насичення структурними дефектами, а також результатом мікротріщин виділень, особливо з холодних хлоридних електролітів.

Експериментальні дослідження з визначення впливу умов електролізу на параметри субмікроструктури опадів показали, що посилення режимів електролізу призводить до збільшення щільності дислокацій та подрібнення мозаїчних блоків до граничних значень (з розширенням  $\sigma = 0,06 \dots 0,07$ ), з подальшим утворенням у них стійких субмікротріщин (див. розділ 2). Найбільш зносостійкі покриття відповідали перехідній області від монолітних до тріщинуватих опадів [9, 37, 46].

Таким чином, спостерігалось зміцнення матеріалу за рахунок процесу пластичної деформації осаду під час електролізу, подібного до

субмікроструктурного зміцнення при пластичній деформації. Хоча в «жорстких» режимах електролізу виділення були пронизані густою сіткою субмікротріщин, їх міцність на зсув і мікротвердість підвищилися, але знизилася зносостійкість [9, 37, 46].

Аналізуючи експериментальні дані, наведені в літературі [9, 37 та ін.], можна визначити залежність  $D=f(\delta)$  (рис. 3.2):

$$D = 17,45\delta^{-1}$$

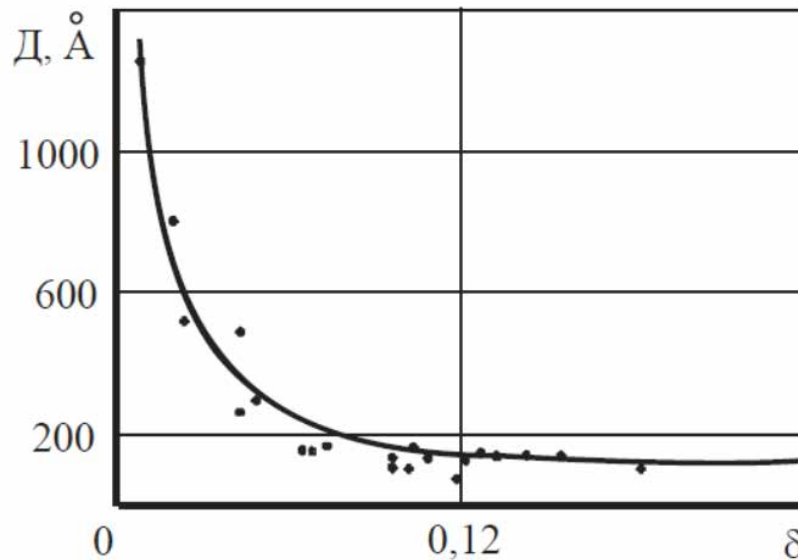


Рисунок 3.2 – Зв'язок між розміром блоків мозаїки та розширенням електролітичного заліза

Для бездефектних матеріалів модуль пружності однаковий для мікроскопічних об'ємів і зразків будь-якого розміру. Реальні матеріали мають різноманітні дефекти, наявність яких впливає на величину модуля пружності. Дійсно, порівняння знайдених значень модуля пружності та дилатації виділень, а також аналіз отриманих закономірностей дозволили встановити лінійність залежності модуля пружності від дилатації, що характеризує структуру матеріалу, не тільки в області пористих виділень, а й перед їх розтріскуванням. Причому область точки перегину дилатації досить точно збігалася з відповідною ділянкою на кривих залежності параметрів субмікроструктури від дилатації. Можна припустити, що після максимально можливої деформації в покриттях утворюються субмікротріщини, які можна

нівелювати дробленням кристалів на блоки і збільшенням щільності дислокацій.

Математична обробка експериментальних даних [9,46,84] дозволила отримати рівняння лінійної регресії функції  $E=f(\delta)$  на перегин у такому вигляді:

$$E=2,17-10,13\delta. \quad (3.2)$$

В області пористих опадів залежність описується рівнянням:

$$E=1,70-3,29\delta. \quad (3.3)$$

Таким чином, отримані залежності дозволяють визначити модуль пружності чавунних покриттів опадового розширення (рис. 3.3).

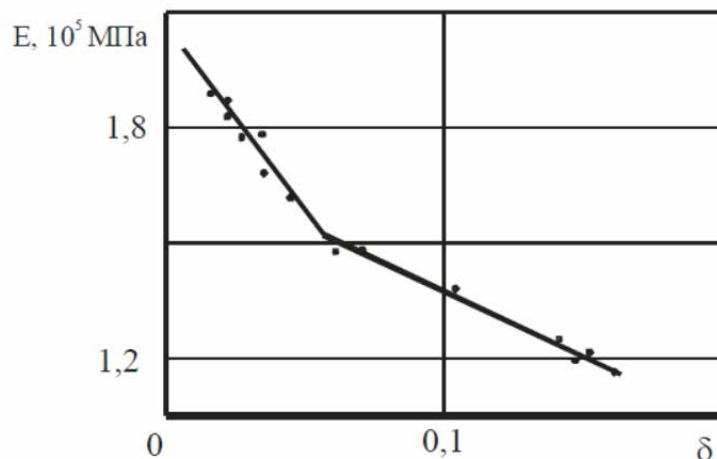


Рисунок 3.3 – Зв'язок між модулем пружності та розширенням електролітичного заліза

Низька міцність електролітичного чавуну пояснюється особливостями утворення покриття на катоді, вихідною структурою та дефектами кристалічної структури. Насправді, якщо побудувати графік залежності межі міцності електролітичного чавуну ( $\sigma_v$ ) від розширення і розміру мозаїчних блоків, то можна побачити, що ці величини дуже тісно пов'язані (рис. 3.6, а і

б). Крім того, залежності  $\sigma_v = f(\delta)$  і  $\sigma_v = f(D-1/2)$ , побудовані за даними експериментальних досліджень [9,46], демонструють три характерні області: I – зростання  $\sigma_v$ , пов'язане зі збільшенням розширення за рахунок подрібнення мозаїчних блоків і збільшення щільності дислокацій аж до переходу структури в «злегка» деформований стан, аж до появи субмікротріщини; II - лінійне зменшення  $\sigma_v$  зі збільшенням дилатації за рахунок утворення і збільшення щільності нових дефектів (субмікротріщин), які розвиваються в осаді при посиленні умов електролізу; III - область майже вертикального зниження міцності перед обваленням осаду (зі збільшенням субмікротріщин, які повністю пронизують осад). Так, при досягненні подовження 0,06 ... 0,07 покриття вже не витримує розтягуючих навантажень. Такі виділення надзвичайно крихкі і не розчиняються з поверхні деталі завдяки високій адгезії до підкладки та достатньому зміщенню в межах розмірів субзерен.

### **3.3 Зв'язок між структурою, міцністю та зносостійкістю електролітних композитів**

Для попередньої оцінки впливу міцності зв'язку компонентів композиту на його зносостійкість можна виходити з функціонального призначення компонентів КЕП і використовувати такі припущення [23 - 41]:

- Функціональне призначення DF в СЕР - сприймати навантаження і рівномірно розподіляти його в роз'ємі.
- Завдяки DF створюється рельєф на поверхні тертя, що забезпечує краще збереження мастильної плівки і запобігає злипанню поверхонь;
- Висока міцність і твердість частинок DF запобігає зношенню найбільш навантажених виступаючих ділянок мікрорельєфу робочої поверхні деталі і забезпечує максимальну стійкість до пластичної деформації (при навантаженні від подряпин, порізів, стиснення і зморщування, що виникають при терті) ;

– Електро модифікація СЕР (мікрохвильова або LV обробка) призводить до утворення міцних фізико-хімічних зв'язків між компонентами СЕР.

### **3.4 утворення сполуки дисперсних фаз та матриці електрохімічних композитів**

Для побудови теорії процесу утворення хімічних зв'язків між ДП і матрицею КЕП дуже важливим є дослідження можливих механізмів взаємного «спікання» твердих тіл, які широко відомі в практиці порошкової металургії [15– 28]. КЕП можна розглядати як найбільш ущільнену порошкову суміш, що складається з двох компонентів: чистого електролітичного заліза та частинок DF. Тоді можна припустити, що взаємодія між компонентами КЕП протікає в три послідовні стадії: утворення фізичного контакту між частинкою і матрицею; хімічна взаємодія матеріалів на межі розділу ДП і матриці; об'ємна взаємодія, що супроводжується релаксацією сил пружності. Утворення нових фаз і міцних хімічних зв'язків між компонентами композиції можливе при підведенні до них ззовні певної кількості енергії при нагріванні різними методами [95,160].

Утворення фізико-хімічного зв'язку між різнорідними кристалічними матеріалами є набагато складнішим процесом, ніж утворення зв'язків однорідних матеріалів, оскільки одночасно відбувається самодифузія, що веде до масопереносу в прикордонну область простору, і дифузійне вирівнювання концентрацій повинні зустрічатися атоми з різними назвами [31]. У дуже частому випадку, коли самодифузія і взаємна дифузія здійснюються за допомогою одного і того ж вакансійного механізму, обидва процеси виявляються взаємопов'язаними. На різних етапах утворення зв'язку це з'єднання може призводити до різних ефектів, які впливають на кінетику утворення зв'язку [40].

У матеріалах, крім безпосереднього контакту різних і взаємно

розчинних металів, існують ще й вільні поверхні. Кінетика процесу дифузійної гомогенізації ускладнюється наявністю кількох різних механізмів масопереносу - об'ємної дифузії, поверхневої дифузії, дифузії через газову фазу. Зародження і розвиток дифузійної пористості, що супроводжує процес дифузійної гомогенізації, дуже важливо для процесу утворення зв'язку; наявність вільних поверхонь також впливає на цей процес [39].

Щоб простежити основні фізичні процеси, пов'язані з утворенням зв'язків між різними матеріалами, розглянемо утворення фізико-хімічних зв'язків у двох випадках:

а) ті, що контактують, є взаємно нерозчинними, тому взаємна дифузія виключається;

б) тіла, які торкаються одне одного, розчиняються необмежено довго.

У першому випадку утворення зв'язку між матрицею та ДП, що складається з атомів різного типу, характеризується зменшенням поверхневої вільної енергії [95]. Збільшення міцності зв'язку між двома поверхнями матеріалу з їх власною питомою поверхневою енергією є енергетично можливим за умови, що новоутворена межа має поверхневу енергію, меншу за суму поверхневих енергій двох ідентичних поверхонь матеріалу в області до поверхня межі, яка утворилася і яка зникла під час її формування [95].

Частинки провідників, які мають електричний зв'язок з матрицею, зазвичай ростуть біля основи і зверху, тому для їх фіксації на катоді потрібні відносно тонкі металеві шари [9]. При цьому поверхня КЕП істотно розвивається і набуває мікронерівності, оскільки провідні частинки, які знаходяться на передньому краї росту осаду, відіграють роль тривимірних зародків кристалізації. Тому спроби отримати товсті шари КЕП з електропровідними частинками великого розміру ( $d > 10$  мкм) можуть закінчитися невдачею. Осад не буде компактим, наприклад, при спробах співосадження електролітичного заліза з карбідом вольфраму [9, 29]. Подібна картина частково спостерігається при електроосажденні КЕП з включеннями провідних або напівпровідникових частинок твердого мастила (графіту,

дисульфиду молібдену) (рис. 3.14).

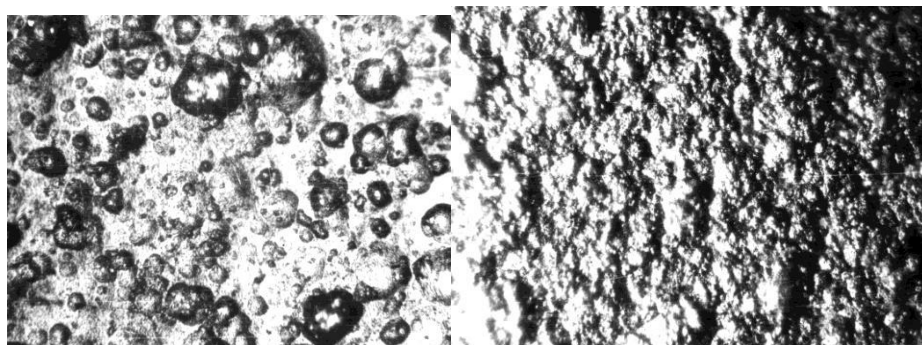
Дещо менше розвивається поверхня частинок карбиду бору з високим електричним опором ( $R=0,445\dots 0,809$  Ом.см при  $t=20\dots 100^\circ\text{C}$ ). Наприклад, при співосаженні електролітичного заліза з В4С також утворюється поверхня осаду (рис. 3.4. б).

Для покращення якості осадів із залученням провідників у деяких випадках вдаються до модифікації поверхні частинок шляхом нанесення ізоляційних або гідрофобних шарів, які перешкоджають росту металу на частинках [9, 32].

Дисперсні діелектрики зазвичай ростуть з основи. Тому КЕП з включеннями непровідних частинок є відносно гладкими і компактними з великою товщиною наносу. Пітінг і дендрити на їх поверхні зазвичай відсутні (див. рис. 3.4).

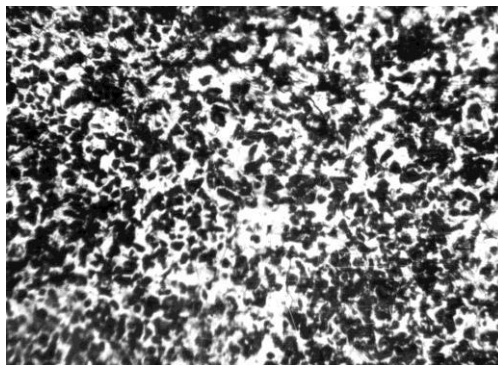
Відповідно, для фіксації частинок діелектрика потрібні металеві шари порівнянного розміру. Візуальні спостереження за процесом електроосаження КЕП з використанням ЕС з дисперсіями ізолятора підтверджують, що утворення дендритів і значного розвитку поверхні осадів не відбувається [9].

Якщо при цьому між частинкою і катодом залишається шар електроліту, то зростаючі кристали відштовхують частинку силою тиску кристалізації [9]. Подальша поведінка частинки DF визначається умовами живлення та росту, площами екранованого нею катода та відкритих ділянок (рис. 3.5).



і)

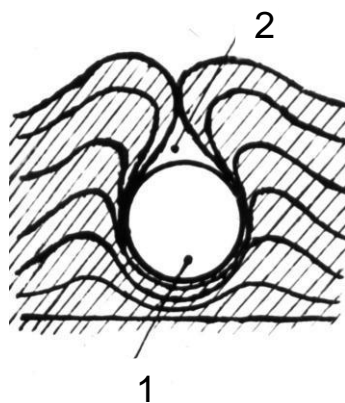
б)



в)

Рис. 3.4 – Утворення осаду в залежності від електрофізичних властивостей наповнювача (x400): дисульфід заліза-молібдену (а); карбід заліза-бору (б); залізо-електрокорунд (с)

У цьому випадку труднощі формування КЕП можуть бути обумовлені властивостями електроліту і його дисперсністю (РС) або компенсуючою здатністю (ВС) в області мікророзсіювання. Фактично, досвід показує, що високоякісний СЕР з високим вмістом частинок зазвичай утворюються з електролітів, осади яких імітують нерівності катода або збільшують початкову шорсткість поверхні зі збільшенням тривалості електролізу.



1 – паї ДФ; 2 - Час

Рис. 3.5 – Встановлення контакту між частинками DF і матрицею

Розподіл металу по мікрорельєфу поверхні катода залежить від співвідношення швидкостей реакцій при спільному розряді кількох іонів, а

також від ВС. Наприклад, при одночасному виділенні іонів металу і водню зі збільшенням густини струму вихід металу по струму для різних електролітів або зростає, або зменшується, або проходить через максимум. У першому випадку мікрорельєф металу на виступаючих ділянках стає більш помітним, оскільки збільшується не тільки густина струму, але і сила струму, і швидше розвивається западина під частинкою. У другому випадку через падіння виходу струму в областях з підвищеною щільністю струму виділяється менше металу і утворення западини під частинкою зменшується або западина не утворюється [9,32]. Роль НД електроліту найбільш яскраво проявляється у випадку, коли частинки є непровідними. Включення частинок електропровідних матеріалів до осадів за рахунок можливості розряду на них іонів металу має бути менш залежним від ПС електроліту. В основному він визначається співвідношенням питомих опорів частинок DF і ЕС [32], електрохімічними властивостями частинок і наявністю шарів, що перешкоджають прямому контакту з поверхнею металу. В останньому випадку поведінка частинок провідників і діелектриків, ймовірно, подібна. Наші експерименти з дослідження КЕП залізо-електрокорунду зі змішаними ЕЦ [46] та численні літературні дані [36, 37 та ін.] підтвердили прогнозований характер впливу умов електролізу на склад КЕП.

Природні та штучні добавки можуть суттєво впливати на формування монолітних КЕП шляхом зміни іонного складу електроліту та формування покриття в областях, близьких до частинок ДП [9].

## ВИСНОВКИ

1 Були розроблені теоретичні Основи електротермічної обробки КЕП Показано, що при термообробці КЕП покращуються пружнопластичні властивості матриці, посилюються зв'язки між дисперсною фазою та матрицею, що призводить до підвищення зносостійкості, міцності та інших експлуатаційних властивостей. відреставрованих частин.

2 На прикладі електролітичного заліза обґрунтовано залежність фізико-механічних властивостей покриттів від їх дислокаційної структури та встановлено, що закономірності зміни структури та властивостей електролітичних покриттів задовільно відповідають відомій структурно-енергетичній теорії пластична деформація і руйнування. Аналіз взаємозв'язку дилатації металу з фрагментацією його блокової структури, фізико-механічних властивостей і руйнування показує, що ефективність електрохімічного методу відновлення деталей обмежена зміцненням і руйнуванням металу під час електроосадження.

3 Запропоновано розрахункові формули для характеристики композиційних матеріалів та визначено закономірності розподілу напружень між структурними компонентами композиції під дією зовнішнього навантаження. Теоретичний аналіз структурно-міцних властивостей композиційних покриттів показує, що міцність гетерофазного матеріалу визначається природою його компонентів, структурними параметрами, а також міцністю міжфазних зв'язків. Запропоновано модель формування шорсткої поверхні КЕП в умовах абразивного зношування, яка враховує міцність зв'язку ДФ з матрицею. Показано, що за оптимального вмісту DF у КЕП в умовах абразивного зношування утворюється мінімальна шорсткість поверхні.

## РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА ДЕЯКІ ВЛАСТИВОСТІ КЕП

Теоретичні дослідження показали, що електротермічна обробка КЕП дозволяє покращити їх фізико-механічні та експлуатаційні властивості, що робить його перспективним для підвищення довговічності нових і відремонтованих частин обладнання лісогосподарського комплексу. Найбільш прийнятними способами обробки поверхні матеріалу є мікрохвилі та мікрохвильовий нагрів. Однак ці ефекти можуть призвести до зміни структури покриттів, розчинення дисперсної фази (ДФ) в матриці з утворенням нових фаз. Тому для розробки технології одержання модифікованих КЕП необхідно експериментально встановити режими обробки, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості покриттів.

### 4.1 питання дослідження

Більшість частин машин лісогосподарського комплексу (лемеші, борони, фрези, лапи культиватора та інші) працюють в контакт з абразивним середовищем. Тому основною метою експериментальних досліджень був вибір параметрів обробки, що забезпечують найвищу зносостійкість покриттів. Динамічні умови роботи деяких деталей машин, відновлених електролітичним залізненням, не можна характеризувати лише втомною міцністю та зносостійкістю. Статистика показує, що велика кількість поломок і аварій на машинах пов'язана з незгасаючими коливаннями, які пружні системи не можуть погасити. Оскільки резонанси можуть виникати під час роботи в ряді динамічно навантажених деталей, важливо було перевірити вплив термічної обробки КЕП на гасіння коливань пружних деталей.

Для пояснення підвищення зносостійкості покриттів необхідно вивчити вплив параметрів модифікації на структуру та фізико-механічні властивості,

таких як мікротвердість, адгезійна міцність, пружні властивості, міцність на розрив, ударна в'язкість та інші. електрофізичні властивості (електричний опір і термоЕРС) наявність залежності між цими властивостями і структурою матеріалу дає можливість контролювати процес модифікації композитів під час різних видів обробки (наприклад, за допомогою мікрохвиль, LV та ін. методів). ). Переробка представляла практичний інтерес.

Огляд літератури та теоретичні дослідження показали, що формування фізичного контакту між частинками ДФ і матеріалом основи КЕП відбувається за рахунок мікропластичної деформації, зумовленої особливостями процесу електролітичної кристалізації. За відсутності хімічних зв'язків міцність зчеплення частинок з основою досягає 5...10 МПа [9,12]. Однак енергії процесу електрокристалізації недостатньо для активації фізико-хімічних перетворень дисперсних частинок. Частилки DF можуть утворювати міцні хімічні зв'язки, коли до них надходить певна кількість енергії ззовні, наприклад, при лазерному або мікрохвильовому нагріванні. Процес активації взаємодії між компонентами КЕП залежить від їх енергонасиченості (вид матеріалу, спосіб отримання та розмір частинок ДФ, структура електролітичної матриці) та утворення контакту між ними. . Температура активної взаємодії заліза з карбідом бору 400-1000 °С, карбідом кремнію 500-1000 °С, карбідом вольфраму 800-1000 °С. Наведені дані відносяться до умов хімічної взаємодії між фазами пірометалургійних металів (порошкові матеріали, плазмові покриття) або мають дуже великий розкид, що не дозволяє визначити види електротермічної обробки електрохімічних покриттів. Швидкість дифузії компонентів КЕП, яка визначається їх структурою, може збільшуватися в сотні разів. При цьому частинки DF можуть бути покриті різними сполуками хемосорбованої борної кислоти та гідроксиду заліза, що може впливати на утворення хімічних зв'язків на межі розділу між частинками та матрицею. Тому для визначення параметрів електротермічної обробки необхідно експериментально дослідити

структуру та фазові зміни КЕП в умовах високотемпературного нагрівання та знайти температуру активації міжфазних реакцій.

Тому в результаті експериментальних досліджень необхідно встановити наступне:

- можливість міжфазної взаємодії між компонентами КЕП при нагріванні;
- вплив електротермічної обробки на структурні зміни ЦЕП;
- вплив параметрів СВЧ та ЛІ на фізико-механічні властивості КЕП;
- Вплив електротермічної обробки на експлуатаційні властивості КЕР.

## **4.2 Порядок проведення дослідження**

При дослідженні механічних властивостей КЕП зразки для дослідження зносостійкості, модуля пружності, межі міцності, ударної в'язкості та гасіння пружних коливань отримували із суспензій електролітів на лабораторній установці, описаній у розділі 2. Поверхню зразків попередньо обробляли не -ізоляційна стрічка або цапонлак; очищення поверхонь наждачним папером; знежирення за допомогою віденської вапна; умивання холодною водою; анодне травлення; умивання холодною водою; початковий режим роботи 20 хвилин при початковій катодній густині струму  $1 \text{ А/дм}^2$ ; покриття. Режими застосування КЕП підтримували постійними:  $\text{pH} = 0,7 \dots 0,8$ ;  $D_k = 20 \dots 22 \text{ А / дм}^2$ ;  $T = 40 \dots 45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Після нанесення покриття зразки стабілізували для 10-денного зберігання. СВЧ-нагрівання проводили на установці типу ІЗ-250-10 з постійними значеннями параметрів: частота струму  $65 \dots 70 \text{ кГц}$ ; напруга на індукторі  $40 \dots 42 \text{ В}$ ; струм індуктора  $10 \dots 12 \text{ А}$  (частота струму контролювалася за допомогою осцилографа на клеммах управління установки, а напруга і струм на індукторі контролювалися приладами установки). Час нагріву до необхідної температури (від 2 до 20 секунд) вибирали на зразках, які не використовувалися в подальших

дослідженнях. Температуру нагрівання ( $T$ , від  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) контролювали за допомогою безконтактного пірометра типу Кельвін-6М.

Зразки обробляли на верстаті TRUMPF L2530 при постійних значеннях частоти лазерного імпульсу ( $100\text{ Гц}$ ) і діаметра променя ( $0,8\dots 1,0\text{ мм}$ ). Інтенсивність термічної обробки змінювалася потужністю, швидкістю руху лазерної головки та відстанню між паралельними доріжками.

При плануванні експериментів з дослідження впливу параметрів лазерної обробки на знос, електричний опір і термоелектричні характеристики КЕП використовував плани з Цкр 23 [106,109]. Факторами були потужність лазера ( $X1$ ), швидкість руху лазерної головки ( $X2$ ), відстань між треками ( $X3$ ) (табл. 4.1).

Для обробки зразків на мікрохвильових або лазерних апаратах розроблені спеціальні пристрої, які виключають їх переміщення під час обробки і забезпечують однакові умови обробки (рис. 4.1).

При дослідженні міцності електрохімічних опадів застосовували метод випробувань на розтяг зразків з матеріалу покриття (див. розділ 2). Зразки для випробування межі міцності покриття виготовляли у вигляді кілець (рис. 4.2, а). Зразки поміщали в спеціальний кільцевий самонасаджувач (рис. 4.2, б) і руйнували на відривній машині Р-500.

Таблиця 4.1

Інтервали варіації незалежних змінних для дослідження впливу режимів лазерної обробки на властивості КЕП

рівні факторів	Змінний код	Значення змінних		
		$X1$ , вівторок	$X2$ , м/хв	$X3$ , мм
базовий рівень	0	80	3.0	2
інтервал варіаторів.		40	1.0	1
Верхній рівень	+1	120	4.0	3
Нижній рівень	-1	30	2.0	1
зіркова точка ( $+\alpha$ )	+1,68	147.2	4.7	3.5

зіркова точка (-α)	-1,68	12.8	1.3	0,5
--------------------	-------	------	-----	-----

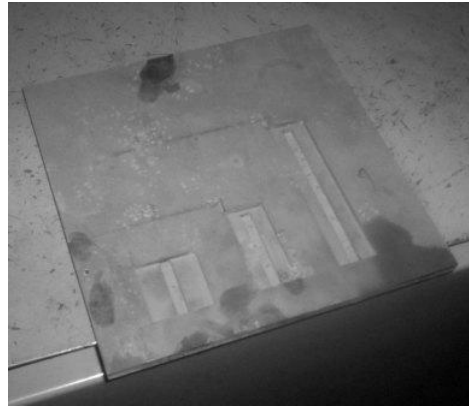


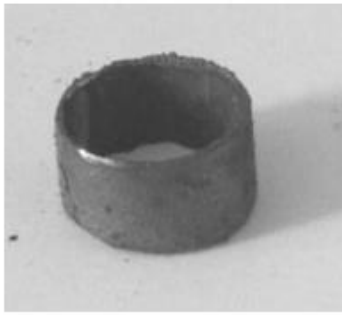
Рисунок 4.1 – Пристрій для фіксації положення зразка під час мікрохвильової або LV обробки

Зазор між внутрішнім діаметром досліджуваного зразка та знімною оправкою був мінімальним. Використання пристрою для рівномірного навантаження обумовлено надзвичайною крихкістю електролітичного заліза. З цієї причини не можна використовувати інші типи зразків, крім кільцевих, оскільки необхідність фіксації головок зразків у затискачах випробувальної машини пов'язана зі створенням затискних зусиль. Визначення міцності покриття проводили за формулою:  $\sigma_B$

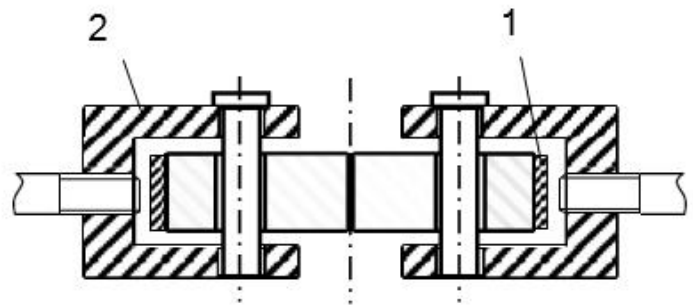
$$\sigma_B = \frac{P}{A}$$

де  $P$  – руйнівне навантаження;

$A$  – видима площа поперечного перерізу зразка в місці зламу.



а



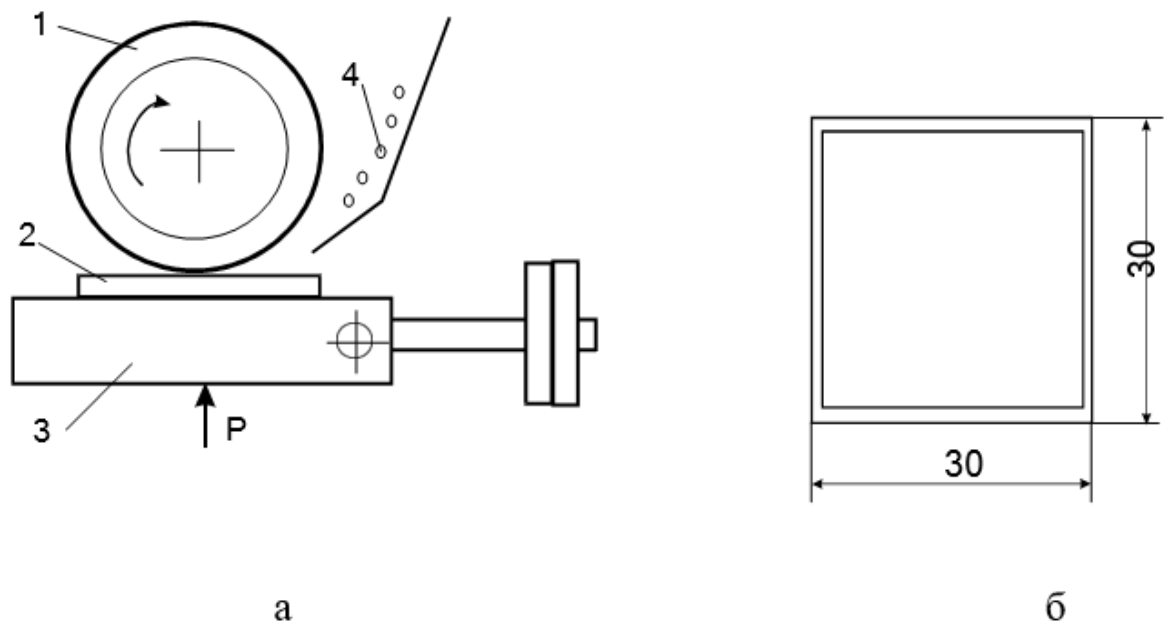
б

1 – зразок; 2 - кулачок

Рисунок 4.2 – Загальний вигляд зразків (а) та схема пристрою (б) для випробування на розтяг зразків покритого матеріалу

Для визначення межі міцності покриття наносили на алюмінієві кільця діаметром 20 мм. До оправки можна було прикріпити до чотирьох кілець одночасно. Підготовку поверхні до нанесення електролітичного покриття проводили так само, як і для визначення модуля пружності, заданого для зразків. Покриття наноситься товщиною від 0,5 до 1 мм. Зразки з дендритами були виключені із серії.

Дослідження відносної зносостійкості при абразивному зношуванні проводили на спеціально розробленій установці згідно з ГОСТ 23.208-79 (рис. 4.3). Суть методу полягає в тому, що при однакових умовах тертя досліджуваного зразка і зразка порівняння утворюються абразивні частинки, які вводяться в зону тертя і притискаються до зразка обертовим гумовим роликком. Вимірюють знос зразків досліджуваного і еталонного матеріалів і оцінюють відносну зносостійкість досліджуваного матеріалу шляхом порівняння його зносу зі зносом еталонного зразка.



1 – гумовий ролик; 2 – зразок; 3 – тримач; 4 – абразив.

Рисунок 4.3 – Схема установки (а) і зразка (б) при дослідженні зносостійкості КЕП

Для випробувань зразків була розроблена установка [46]. Діаметр ролика 48...50 мм, ширина  $(15 \pm 0,1)$  мм, твердість гуми 78...85 од. по ГОСТ 263-75. Кут нахилу направляючої  $(45 \pm 2)^\circ$ . Для фіксації зразка було розроблено тримач зразка, торцеві зазори між стінками та роликом якого становили не менше 5,0 мм. Перед випробуваннями валик зношували, натираючи його поверхню наждачним папером типу 2 з зерном 8Р і закріплюючи в тримачі зразка на плоскій сталевій пластині з навантаженням на валик  $(22 \pm 1)$  Н до повного прилягання до поверхні по довжині формувального ролика. Після нанесення валик промивали ацетоном.

Як абразив використовували річковий пісок із заплави р. Десна. Пісок сушили в сушильній шафі 1...1,5 години при температурі 105...1100С і просівали через сито з діаметром комірок 1 мм. Для кожного дослідження готували нову партію піску. Пісок подавався за допомогою спеціально розробленого оригінального дозатора, який забезпечував стабільне та однакове дозування вибухового агента. При дослідженнях абразивної зносостійкості основи та КЕП використовували пластини довжиною 30-50

мм, шириною 30 мм і товщиною 1 мм зі сталі Ст3, на які наносилося покриття товщиною  $(0,5 \pm 0,1)$  мм (рис. 4.3 б). Контрольні зразки виготовляли зі сталі 35 в відпаленому стані з HV 190-200 та сталі 65G з HRC52. 56. Зношення визначали шляхом зважування зразків на аналітичних вагах ВЛР-200М з точністю 5,0 10<sup>-5</sup> г. Час випробування становив від 5 до 40 хвилин і визначався необхідністю досягнення значення зносу щонайменше 5 мг.

При визначенні відносної зносостійкості зразок притискали до ролика із зусиллям  $(44 \pm 0,25)$  Н, яке визначали та калібрували за допомогою переносного зразкового динамометра ДОРМ-3-0,1. Ролик обертвся в напрямку, вказаному на рисунку 4.3, з частотою  $n=60 \cdot 2$  об/хв. При цьому встановлювався дозатор, який забезпечував безперервну подачу піску в зону тертя по всій ширині котка. Під час експерименту положення зразка фіксували строго в одному положенні за допомогою зразка. Для видалення мастильних і оксидних плівок з поверхні зразків перед випробуваннями їх очищали, двічі промиваючи в бензині та ацетоні, поміщаючи зразок на фрикційну машину і знову знімаючи пінцетом. Після знежирення зразки висушували при 398 К до постійної маси. Проте в процесі випробувань на поверхні зразків накопичувалися продукти зношування, які перед кожним випробуванням видаляли розчином СМС «Універсал» з наступним промиванням гарячою проточною водою протягом 10 хвилин і сушінням при 130 °С. протягом 20 хвилин. Зважування проводили після охолодження зразків до кімнатної температури. Попередні експерименти показали, що після такої обробки досягається постійна вага зразків. Після кожних 12 випробувань зовнішній діаметр валика перевіряли та замінювали, якщо діаметр був менше 48 мм.

Відносну зносостійкість зразків визначали за досягненням зносу при обжарюванні парою; для визначення часу його настання для кожного зразка була побудована залежність зносу від напрацювання і за цим оцінено кінець терміну служби (рис. 4.4).

При дослідженні впливу вмісту дисперсної фази на зносостійкість покриттів використовували спеціальну ванну об'ємом 5 л (рис. 2.1, розділ 2). до загального об'єму електроліту [46].

Зразки являли собою пластини зі сталі Ст3 розмірами 170 10 0,6 мм, рівномірно вкриті з обох боків шаром товщиною 0,05 0,01 мм (рис. 4.5).

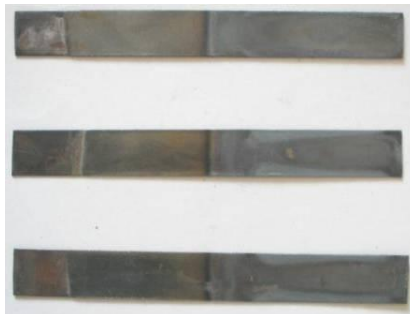


Рисунок 4.5 – Приклади дослідження внутрішнього тертя КЕП

Вільні коливання були викликані швидким зняттям навантаження, прикладеного до неприкріпленого кінця зразка. Поперечні коливання, перетворені коливаннями стрілки вольтметра магнітоелектричної системи, жорстко зв'язаної із зразком, коливаннями ЕРС на затискачах вольтметра, реєструвалися на папері за допомогою осцилографа в затухаючу синусоїду (рис. 4.6).

Зразки для визначення модуля пружності наносили на алюмінієвий дріт діаметром 3 мм. Товщина шару становила 08–12 мм (рис. 4.7). Зразки з дендритами на зовнішній поверхні були викинуті. Після покриття зразок розрізали на дві частини довжиною 5-6 см кожна. Для цього використовували токарний верстат, у патрон якого встановлювали пристрій із зразком, а до супорта кріпили електродвигун, оснащений алмазним диском діаметром 150 мм і товщиною 1 мм. Зразок різали при частоті обертання колеса 1500 об/хв у рясних струменях теплоносія, що виключало нагрів зразка.

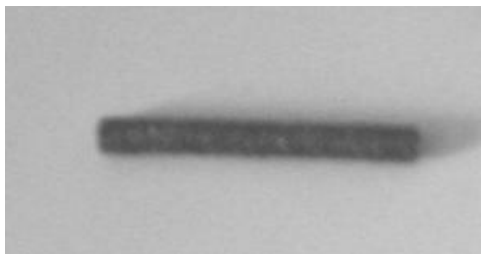


Рисунок 4.7 – Загальний вигляд зразка матеріалу КЕР для дослідження модуля пружності

Ударну в'язкість досліджували руйнуванням зразків на маятниковому свердлі КМ-50 за методикою [8]. Зразки для дослідження ударної в'язкості виготовляли з відпаленої сталі Ст.3 за ГОСТ 1524-42 (рис. 4.8). Після отримання покриттів товщиною 0,5-0,1 від механічної обробки відмовлялися. Ударну в'язкість і пластичність (кут вигину зразків після руйнування) оцінювали за результатами 4 випробувань.

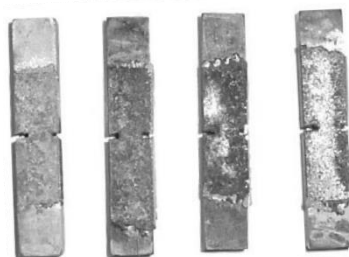


Рисунок 4.8 – Зразки для випробувань на удар

Дослідження впливу різних покриттів на ударостійкість матеріалів ускладнюється тим фактом, що ударостійкість змінюється залежно від конструктивних факторів, а результати випробувань можна порівняти лише на зразках однакової форми та розміру.

Відповідно до ГОСТ 9454-78 для ударних випробувань приймається зразок з надрізом в зоні розтягуючих напруг. Стійкість такого зразка багато в чому залежить від ретельності зрізу. Використання зразків без надрізу в центральній частині неможливо для низьковуглецевих сталей через їх неруйнівну затримку між опорами випробувальної машини. Тому для дослідження впливу електрохімічних покриттів на ударну в'язкість низьковуглецевих сталей не можна використовувати зразки зі стандартним

надрізом, оскільки при наплавленні неможливо зберегти форму і розміри надрізу, а також зразки без виїмка. Цих дефектів вдалося уникнути у зразках, рекомендованих у [24].

При розриві такого зразка надріз робиться паралельно напрямку удару. При цьому енергія удару зосереджена в центральній частині зразка, як і при випробуванні стандартних зразків з насічкою. До переваг таких зразків можна віднести менший вплив попередньої обробки зразків, чистоту і точність надрізів на результати випробування на удар, оскільки бічні надрізи мають менший вплив на результати випробування [34].

Мікроструктуру досліджували на мікрошліфах, виготовлених за загальноприйнятими методиками [19, 38]. Зразки для виготовлення шліфувальних кругів використовували для визначення зносостійкості, модуля пружності, межі міцності, демпфірування та ударної в'язкості КЕП. Об'ємний вміст ДВ у покритті визначали методом стереометричного аналізу випадкових розчинених речовин у поєднанні з лінійним методом [39].

Як показав досвід, зниження електричного опору та термоелектричної потужності КЕП при нагріванні до 580...620 °С пояснюється зміною субмікроструктури матриці та зменшенням мікростворень кристалічної решітки. Дуже характерно, що зв'язок електричного опору з щільністю і параметрами субмікроструктури заліза найбільш яскраво виражена при нагріванні в області перед фазовими перетвореннями (див. рис. 4.8). При температурі нагрівання понад 580...620 °С лінійний зв'язок втрачається. Зростання електроопору КЕП пов'язане з проявом хімічної взаємодії дисперсних частинок карбіду бору та заліза. При цьому з «чистого» електролітичного заліза утворюються карбіди і бориди заліза, які мають електрофізичні властивості. Дифузія бору і вуглецю в кристалічну решітку заліза також призводить до збільшення її мікростворень, що відображається на зміні розширення та електричного опору покриттів.

Термічний вплив лазерного променя на структуру КЕП також призвів до утворення в матеріалі ряду зон: при плавленні покриття (зона легування і

зміцнення з рідкого стану - рис. 4.8,а); без розплавлення покриття (зона термічної обробки і зміцнення в твердому стані - рис. 4.8,б); повне переплавлення покриття з основним металом (рис. 4.8,в). При відведенні теплової енергії від точки нагріву виникають шари покриття з різними властивостями (див. рис. 4.8 а).

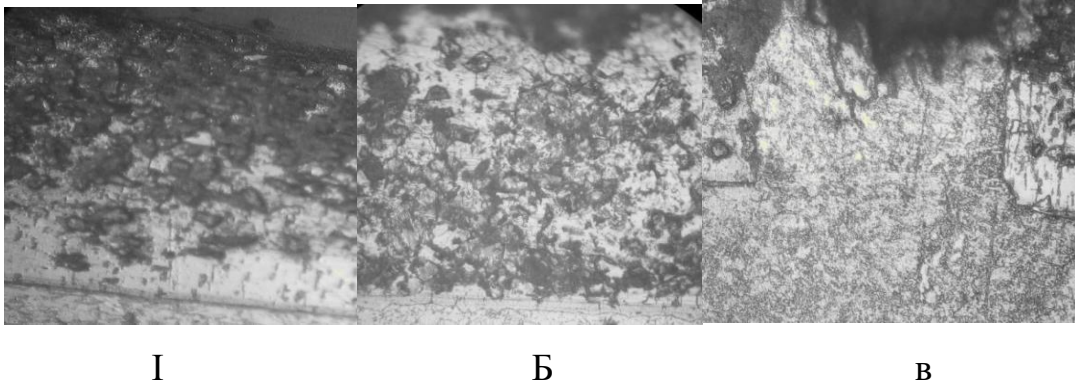


Рис. 4.9 – Мікроструктура КЕП після лазерної обробки (x400):  
 а) з оплавленням поверхневого шару; б) без плавлення  
 поверхні; в) повне переплавлення покриття з підкладкою

У зоні плями нагріву утворилася область неоднорідного матеріалу, в якому в рідкому стані (перший шар) відбувалися фазові перетворення і активні процеси дифузії. Далі йшла ділянка з фазовими і структурними перетвореннями в твердому стані (другий шар) і ділянка з незначним тепловим впливом, в якій не відбулося видимих змін шарової структури (третій шар).

Процес легування матриці КЕП бором під впливом лазера складається з наступних етапів: 1) нагрівання легуючого DF покриття до досягнення ним температури плавлення матеріалу, що контактує з основою; 2) утворення рідкої фази та змішування фаз у зоні ванни розплаву; 3) кристалізація рідкої фази. У зоні покриття з переплавом у першому шарі на кромці розплаву спостерігалася структура, що складається з оксидів, боридів і карбідів заліза (рис. 4.8а). Частинки карбиду бору в «чистому» вигляді, пори і розшарування металу повністю були відсутні. Утворені при переплаві сполуки мали високодисперсну структуру та рівномірний розподіл. Спостерігалось

часткове або повне згоряння домішок сплаву. При досягненні температури плавлення евтектики (близько 1400 °C) на межі розділу матриці та поверхні частинки DF утворюється рідкий шар і інтенсифікується процес насичення бором поверхневого шару [119,120,130]. На першому етапі легування відбувається за дифузійним механізмом, з утворенням рідкої фази на другому етапі переважає інший механізм легування - конвективне перемішування фаз. Встановлено [21], що масообмін в ванні розплаву відбувається потоками від центру лазерної плями до її країв за рахунок градієнта сил поверхневого натягу, викликаного різницею температур у центрі та на краях ванни розплаву. . В результаті виникає циркуляція потоку. Зміна тиску рухомих потоків врівноважується силами поверхневого натягу під час викривлення поверхні розплаву, що призводить до погіршення мікрогеометрії обробленої поверхні, оскільки через високі швидкості охолодження надлишкова фаза не висвітлюється. час відокремлення від розплаву і отримання твердого розчину, який характеризується високим ступенем перенасичення [1]. Це призводить до появи тріщин у поверхневих шарах деталей через появу значних залишкових напружень.

Дослідження мікротвердості глибини покриття показали, що товщина зон залежить від параметрів лазерного випромінювання. Встановлено, що при різних видах термічної обробки (щільності потоку випромінювання) глибина легування матеріалу покриття різна при однаковому вмісті частинок ДП [35]. Параметри легованого шару (товщина шару і максимальна висота поверхневих мікрорівномірностей) більшою мірою залежать від щільності потоку випромінювання і меншою – від швидкості руху лазерного променя. Збільшення щільності потоку випромінювання призводило до збільшення глибини зони плавлення і, як наслідок, товщини легованого шару, яка визначається положенням ізотерми, що характеризує температуру плавлення матеріалу. Проте при низьких швидкостях руху лазерної головки (до 400 мм/хв) зі збільшенням густини потоку випромінювання понад 108 Вт/м<sup>2</sup> відбулося деяке зменшення глибини легування за рахунок випаровування

матеріалу і поява додаткових енерговитрат. Збільшилася висота мікронерівностей армованої поверхні.

#### ВИСНОВКИ

1. Показано, що інтенсивність електронного нагріву мікрохвильових та НВ композитів залежить від природи дисперсної фази та матриці, які можуть взаємодіяти при нагріванні з утворенням нових фаз. Показано, що товщина модифікованого шару залежить від типу впливу, природи компонентів і структури композитного покриття, частоти струму, щільності потоку лазерного випромінювання, тривалості імпульсу та довжини хвилі випромінювання.

2. Температуру активації міжфазної взаємодії компонентів гетерогенного матеріалу визначено експериментально на прикладі електрохімічних залізо-борокарбідних композитних покриттів. Показано, що для цього матеріалу вона повинна бути в межах 853...893 К. Взаємодія компонентів підтверджується зміною електричного опору, термоЕРС, щільності композиційного матеріалу, його міцності та зносостійкості.

3. Показано, що КЕП має найвищу зносостійкість після електромодифікації, де утворюються зв'язки між дисперсною фазою та матрицею та зберігається неоднорідна структура матеріалу.

4. Зносостійкість електромодифікованих композитних покриттів підвищується в 1,5-2,5 рази, а міцність на розрив в 4-5 разів порівняно з необробленими КЕП. При цьому мікрохвильова обробка дозволяє модифікувати покриття по всій товщині і лазерну обробку без порушення морфології поверхневого шару на 0,05-0,1 мм.

## РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ, ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНА ОБРОБКА КЕП

### 5.1 питання дослідження

Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що електротермічна обробка дозволяє покращити фізико-механічні властивості КЕП і тому є перспективною для підвищення довговічності відновлених та армованих частин обладнання лісогосподарського комплексу. Електромодифікація може бути здійснена з двома цілями. Перший – підвищення зносостійкості за рахунок формування на поверхні деталей КЕП із міцним поверхневим зв'язком між компонентами та збереженням неоднорідності матеріалу. Другий – нанесення на вироби з подальшою електротермічної обробки композиційних покриттів, які характеризуються тим, що мають низькі внутрішні розтягувальні напруги до переходу від розтягуючих до стискаючих і дозволяють підвищити стійкість виробів до циклічних навантажень за рахунок утворення досить зносостійких поверхневих шарів з напругою стиску. Крім того, переплавлення поверхневого шару повинно відбуватися з частковим або повним перетворенням вихідних елементів неоднорідного матеріалу. Ці цілі досягаються високотемпературним нагріванням деталей КЕП за допомогою мікрохвиль. Така обробка може призвести до різкої зміни як конструктивних параметрів матеріалу (склад, решітка, текстура тощо), так і фізико-механічних властивостей (див. глави 3 і 4). Нові фази, отримані при такій обробці, мають різні кристалофізичні властивості, а тому відрізняються питомим об'ємом, що при збереженні загальної поверхні деталей може призвести до різкої зміни рівня HV, аж до розтріскування та руйнування покриття. Деталі з такою поверхнею можуть мати високу зносостійкість. При цьому знижується їх стійкість до динамічних впливів, процесів втоми і

резонансних явищ.

Методи LY та мікрохвильової модифікації дозволяють отримати різну товщину модифікованого шару. Тому необхідно проаналізувати номенклатуру відновлюваних частин обладнання лісогосподарського комплексу та розробити рекомендації щодо вибору раціонального способу електромодифікації КЕП з точки зору допустимого зносу, матеріалу деталі, експлуатації, умови та інші параметри.

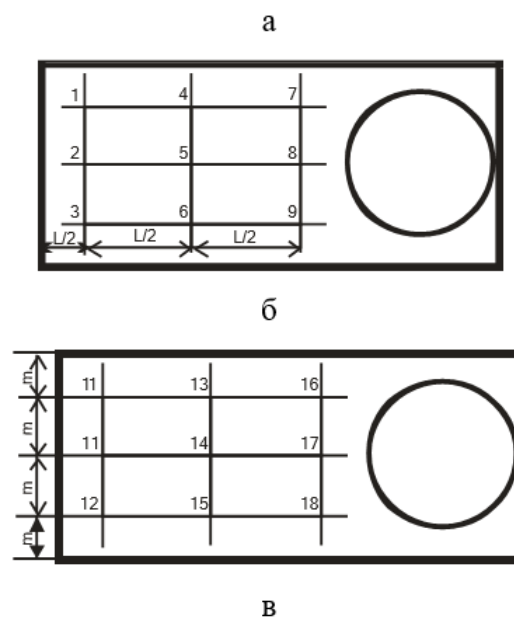
Підвищення рівномірності електролітичних покриттів чавуну є актуальним завданням, оскільки це дозволяє істотно здешевити оздоблення деталей покриттями. Водночас систематичних досліджень диспергуючої та вирівнюючої здатності електролітів заліза на сьогоднішній день недостатньо. Не проводився пошук добавок до електролітів, які б покращували рівномірність покриттів і покращували якість їх поверхні, особливо для металевих відкладень товщиною 50...500 мкм, використовуваних для компенсації зносу деталей. При цьому необхідно враховувати зміну інших властивостей наносу, найважливішою з яких є міцність зчеплення покриття з основою. Крім того, для нанесення однорідних покриттів на деталі необхідно розробити підвісні пристрої та захисні екрани для невідновлюваних поверхонь.

Для перевірки результатів лабораторних досліджень зносостійкості покриттів доцільно провести порівняльні випробування окремих деталей з модифікованим КЕП і деталей, армованих іншими методами, перевірити технологічний процес у виробничих умовах і дати рекомендації щодо його практичного впровадження в ремонтне виробництво. Провести техніко-економічне обґрунтування технологічного процесу підвищення ресурсу роботи деталей машин з використанням модифікованого КЕП.

Для нанесення однорідних покриттів на деталі необхідно розробити і випробувати на практиці підвісні пристрої і захисні екрани для поверхонь, що не підлягають санації і армуванню. Перевірити умови виробництва обладнання для обробки деталей з НВ і СВЧ покриттями.

Струминне перемішування здійснювали пропелерною мішалкою на базі лабораторної мішалки МЛТ-3 з плавним регулюванням частоти обертання приводу, встановленої в окремій секції. Частоту обертання приводу під час змішування змінювали в діапазоні від 200 до 600 об/хв. Потік ЕК до робочої частини ванни здійснювався через перфорований рельєф дна. Для контролю витрати в окремій секції розроблено та встановлено витратомір з дифманометром типу Вентурі. Ванна, перфорована нижня перегородка і всі деталі витратоміра були виготовлені з вініпласту, який після складання був оброблений 30% розчином сірчаної кислоти для виключення виділення компонентів матеріалу при застосуванні КЕП.

Рівномірність вмісту DF в ЕК визначали ваговим аналізом проб, відібраних у заданих точках ванни, координати яких визначали за шаблонами (рис. 5.2). У кожній точці проводили два вимірювання на рівні ванни - 50 мм від дна ванни та 50 мм від рівня електроліту, що відповідало положенню верхнього та нижнього зразків на суспензії.



1 – дірчасте дно перегородки; 2 – окрема секція; 3 - діафрагма

Рис. 5.2 – Схема ванни (а) та діаграма координат точок відбору проб (б, в)

### 5.3.1 Підвищення однорідності покриттів

Дослідження показали, що однорідність покриттів залежить від складу електроліту. Після вибору найбільш значущих коефіцієнтів за критерієм Стьюдента було отримано вираз (Додаток Е):

$$K_n = 1,1642 + 0,011X_1 - 0,019X_2 - 0,018X_3 + 0,01X_{12} + 0,016x_1x_2 + 0,021x_1x_3 - 0,007x_2x_3. \quad (5.2)$$

Аналіз експериментальних даних (рис. Е.1 - Е.3) показав, що вплив іонів  $Ni^{2+}$  на однорідність покриттів був найменшим.

Міцність зчеплення залізонікелевих покриттів з підкладкою (Fe-Ni, кг/мм<sup>2</sup>) також залежить від зміни вмісту іонів легуючих добавок в електроліті:

$$Fe-Ni = 46,23 + 2,40X_1 - 1,79X_3 - 2,29X_{12} - 0,48X_{22} - 1,81X_{32} + 0,68X_{1X_2}. \quad (5,3)$$

Негативний вплив підвищеного вмісту тартрату натрію в чавунній ванні на адгезійну міцність і позитивний вплив на однорідність покриттів може бути пов'язаний з додатковою пасивацією катода комплексними сполуками заліза (III). Підвищення рівномірності та міцності зчеплення покриттів з підкладкою зі збільшенням вмісту іонів нікелю в наших експериментах узгоджується з деякими літературними даними [29,40]. Оскільки електроосадження нікелю відбувається з меншою перенапругою в порівнянні з залізом при потенціалах, відповідних початковому періоду електроосадження покриттів, відносний вміст нікелю в сплаві в прилеглих до основи шарах більше, ніж в об'ємі електроосадженого металу [40]. Отже, можна припустити, що підвищення міцності зчеплення покриттів з підкладкою зумовлене зазначеною обставиною. Слід зазначити, що позитивний вплив нікелю на адгезію покриття до основи пояснюється в літературі таким чином. Відомо, що отримані залізонікелеві покриття виявляють високу пластичність і менші внутрішні напруження при низьких густинах струму [9, 40].

Водночас аналіз набору даних показує, що можливе інше пояснення

зміни адгезії шарів заліза до підкладки під впливом нікелю на процес осадження. У літературі [43] однією з умов досягнення високої адгезії покриттів є утворення сплавів на межі розділу з підкладкою. Однак ця думка не підтверджена експериментальними даними. За даними роботи [133], при осадженні покриттів із залізонікелевого розчину на початкових режимах електролізу в осад входить 1,5...2 % нікелю. Однак велика кількість легуючого елемента не призводить до значного підвищення міцності з'єднання.

### 5.3.2 Організація відновлення та армування деталей електромодифікованими КЕП

Як показано вище, електрорізняця КЕП покращує їх фізико-механічні та експлуатаційні характеристики і може бути рекомендована до впровадження у виробництво. Однак ефективність його застосування залежить від умов роботи деталей, їх матеріалу та форми, що необхідно враховувати при класифікації та для кожної групи деталей рекомендувати певний метод електромодифікації з урахуванням її особливості.

Для цього необхідно точно знати марку і хімічний склад матеріалу, що обробляється, вибрати вид попередньої обробки поверхні, що покривається, і забезпечити високу адгезію до поверхні деталі, зняти поверхневий шар металу, зруйнованого експлуатацією. Розмір зруйнованого шару можна визначити, враховуючи механізм зносу деталей. в поєднанні

Необхідно знати вимоги до експлуатаційних властивостей шарів робочої поверхні деталей та умови їх роботи. Підвищення зносостійкості деталей вимагає термічної обробки КЕП з незначною зміною ГВ, цілеспрямованого забезпечення та утворення міцних хімічних зв'язків між ДФ і матрицею. Для деталей, що працюють в умовах циклічного або динамічного навантаження, необхідно використовувати режими модифікації КЕП, які підвищують втомну міцність за рахунок отримання поверхневих шарів з напругою стиску. Варіюючи вид і вміст ДП, а також режими

термообробки можна створювати поверхні деталей з певною втомною міцністю.

Необхідно знати вимоги до шорсткості поверхні після електромодифікації КЕП, що необхідно для призначення режимів обробки з або без переплавлення поверхні.

Необхідно знати форму оброблюваної деталі в цілому, а також геометричні параметри ділянки, яку необхідно армувати. Це визначає вид електромодифікації КЕП і умови обробки деталей.

Уніфікована технологічна схема електролізного виготовлення деталей дозволяє організувати видобуток деталей різного призначення в одному потоці за принципами групової технології, що дозволяє ефективно використовувати основне обладнання за рахунок підбору технологічно однотипних виробів для обробки, зменшити потребу підприємства в машинах, пристроях і обладнанні. Порушення цього принципу призводить до збільшення витрат на ремонт, що перешкоджає раціональному використанню технологічного та металообробного обладнання [38].

Основним завданням технології відновлення є усунення дефектів зношених циліндричних поверхонь як внутрішніх, так і зовнішніх. Ця ознака може бути узагальненою конструктивною ознакою, що визначає схему технології нанесення покриттів (взаємне розташування анодів і катодів, співвідношення їх площ, тип гідродинаміки ЕК, тип гальванічної апаратури та інші).

Справді, в переважній більшості випадків основним дефектом деталей, що подаються на реставрацію, є знос циліндричних поверхонь (поєднання підшипника вала, втулки поршня та ін.) [1, 23]. Деталі з циліндричними поверхнями зношування становлять більше 50% усіх тракторних муфт [25]. Ці групи деталей виготовляються з дорогих конструкційних і легованих загартованих сталей і визначають термін служби агрегатів і машин. Тому деталі, що надходять на реставрацію, слід розділити на два класи: реставрація зовнішніх і внутрішніх поверхонь.

Одним з рівнів класифікації має бути узагальнення деталей за змістом необхідних операцій обробки і типового набору відповідного механічного обладнання, оскільки вони є важливими компонентами технології. Вибір виду обробки (попередня, остаточна обробка) і виду гальванічного покриття (складу КЕП) багато в чому залежить від умов роботи деталей (вид і характер навантаження і мастила, навколишнє середовище, термічні та ін.) швидкісний режим). Тому поділ на підкласи має враховувати визначальні ознаки та ґрунтуватися на конструктивно-технологічній подібності деталей (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Формування підкласів деталей в залежності від умов праці

НІ н/п	нижчий клас	умови праці
1	сокири, циліндричні пальці	Ударні навантаження з обмеженим змащенням і високою температурою
2	Палиці, сокири, крокові пальці	контактні навантаження з обмеженим рухом
3	розподільні та ексцентрикові вали	Контактні та ударні циклічні навантаження при високих швидкостях руху
4	Шатуни не круглі, колінчасті вали	Циклічні навантаження
5	циліндр	Високі швидкості руху при підвищених температурах і обмеженому мастилі
6	вкладишів і вкладишів підшипників	Статичні та динамічні навантаження в пресових з'єднаннях
7	корпус і деталі основи	Циклічні навантаження та фретинг-корозія
8	Деталі ґрунтообробної техніки, деталі систем всмоктування та нагнітання	Рух в абразивній, рослинній масі, потоці рідини та повітрі з абразивними частинками

З метою групування деталей розроблено схему функціонального зв'язку конструктивно-технологічних параметрів деталей з технікою реставрації (табл. 5.3).

Схема зв'язку показників деталей з технологією електромодифікації

НІ	Конструктивно-технологічні параметри деталей	параметри електромодифікації
1	умови праці	Тип електричної модифікації: - формування високої зносостійкості за рахунок збільшення зв'язку між ДП і матрицею; - утворення нового матеріалу на поверхні деталі під напругою стиску.
2	Технологічні властивості (матеріал, хіміко-термічна обробка, псування і руйнування структури поверхневого шару в процесі експлуатації)	Склад електроліту та види анодної підготовки. Склад і процес гальванічного покриття.
3	Конструктивні особливості	Типові розміри гальванічних і термомеханічних пристроїв. зарядка електролізерів
4	знос робочих поверхонь	Товщина нанесеного і модифікованого шару. Склад технологічних ліній.

Згідно з цією схемою деталі, що входять в групу, були відібрані за рядом схожих ознак: подібні конструктивно-технологічні характеристики, комбіновані умови експлуатації, однакові типорозміри гальванічної апаратури і трансформаторів струму, однаковий тип механічного обладнання, подібні режими нанесення та обробки покриття, певне навантаження ванн, подібність вторинних та інших дефектів деталей та їх комбінацій [18, 23]. Це дозволило класифікувати 16 груп деталей (рис. 5.3).

Вибір гальванічного покриття, складу електроліту і режимів електролізу для групи залежить від умов експлуатації деталей і необхідності відтворення і поліпшення фізико-механічних властивостей робочої поверхні за рахунок технологічних впливів. Рекомендації щодо вибору покриттів,

електролітів і режимів електролізу наведені в роботах [1-4,9 та ін.].

Слід зазначити, що це питання ще не вичерпано і є предметом постійного інтересу дослідників техніки.

Найбільш масовими є деталі, що відносяться до груп циліндричних і некруглих стержнів, ступінчастих валів і осей [1,2, 23]. Їх відновлення електрохімічним методом розроблено і впроваджено на багатьох підприємствах. Тому вдосконалення технології підвищення якості покриттів повинно йти в напрямку використання нових модифікованих КЕП і розширення номенклатури деталей за рахунок відновлення тих, що працюють у найважчих умовах експлуатації. Підвищення продуктивності відновлення можна забезпечити інтенсифікацією електролізу за допомогою гідромеханічної активації поверхні росту [35-38]. Доцільно покращувати техніко-економічні показники технологічних ліній для типових деталей, які вибираються за спільністю конфігураційних елементів групи деталей і поверхонь зношування, наявності найбільш характерних дефектів і зносу, а також як їх типовий розподіл. Спільність технології будівництва.

Аналіз умов роботи деталей дозволить визначити вид попередньої підготовки поверхні, застосування та склад КЕП, а також тип і спосіб їх електромодифікації. Крім того, вибір параметрів лазерного випромінювання повинен здійснюватися після аналізу всіх врахованих властивостей. Для прогнозування властивостей поверхневого шару після електромодифікації КЕП необхідно враховувати дані про товщину модифікованого шару, зміни мікротвердості та відносного подовження, дані про контроль електроопору та термоЕРС, перерозподіл легуючих елементів, дані про електричний опір та термоЕРС, а також дані про товщину модифікованого шару. та ін., перетворення неметалічних включень. Ці параметри є найбільш важливими для апріорного контролю необхідних експлуатаційних показників поверхні зміцнюваної поверхні.

#### **5.4 Порядок випробувань і впровадження технологічного процесу**

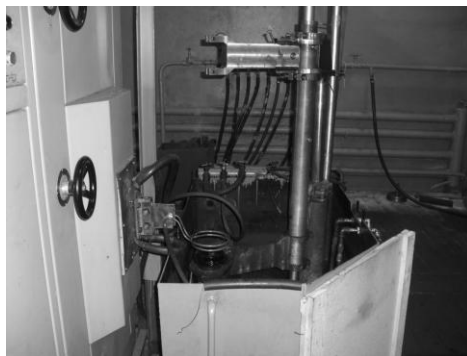
Відповідно до класифікації деталей, що відновлюються модифікованим КЕП (див. главу 5), для затвердження технологічного процесу були обрані гідророзподільні золотники, хрестовини, шворні, зуби екскаватора та інші деталі (рис. 5.6).



Рисунок 5.4 – Деталі, відновлені модифікованим КЕП: а) гідророзподільники; б) хрестики; в) точки опори



I



Б



Рис. 5.8 - Загальний вигляд систем НВЧ з обладнанням для обробки деталей

### **5.5 випробування технологічних процесів та експериментальна перевірка деталей з електромодифікованим КЕП**

Електролітичні покриття із заліза найкраще відповідають вимогам ремонту гідрообладнання. Вони характеризуються високою зносостійкістю та іншими досить високими міцнісними властивостями. Прасування дозволяє наносити на зношені деталі шари металу товщиною до 1 мм, покриваючи будь-які ремонтні розміри.

За підрахунками ремонтного фонду гідророзподільників, відхилення від номінального розміру в 90% деталей зазвичай знаходиться в межах 0,2...0,5 мм. Лише близько 10% котушок мали знос менше 0,1 мм і могли бути відновлені шляхом хромування. Тому основним способом ремонту гідророзподільників є виготовлення нових котушок за ремонтними розмірами корпусу, що вимагає значних витрат.

Випробування технологічного процесу нанесення КЕП показали, що

захисні пристрої (чохли) з фторопласту показали найкращі результати в ізоляції поверхонь, які не підлягають відновленню. Проте в тестову партію входили котушки різних виробників, які мали суттєві відмінності в розмірах, а також зміни в конструкції (наприклад, різні технологічні отвори). Тому в просторі між деталлю та кришкою накопичувалися тверді частинки та залишки травильного електроліту, що ускладнювало процес миття та забруднювало робочі розчини. Це не дозволяло використовувати типові захисні пристрої з фторопласту, а лише захисне фарбування (рис. 5.8).

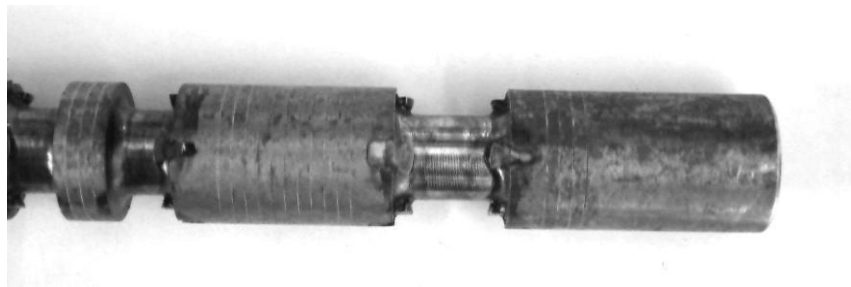


Рис. 5.8 – Змійовик гідравлічний Р-100

Використовуючи ванну з контрольованою гідродинамікою потоку, можна було отримати покриття з контрольованим вмістом DF КЕР від 20 до 24% (об.). 0 ... 5,5 ГПа.

Дослідження рівномірності розподілу ДВ в об'ємі електроліту під час відпрацювання технологічного процесу в дослідній ванні показало, що запропонована схема ванни з витратоміром забезпечує рівномірний розподіл частинок електрокорунду та дозволяє контролювати витрату. параметрів під час процесу нанесення покриття. При швидкості потоку більше 0,2 м / с фаза повністю захоплювалася потоком і рівномірно розподілялася по всьому об'єму електроліту. Використання в конструкції седиментаційної ванни КЕРП витратоміра Вентурі з плавно звуженими трубками і увігнутим днищем з перфорованим стабілізатором створило потік, який повністю змиває частинки без утворення зон застою і седиментації ДП. по всьому об'єму ванни. При збільшенні середньої швидкості потоку ЕК до 0,15 ... 0,2 м / с відхилення від середньої концентрації ДВ становило не більше 10 ... 15%. Змішування характеризується відсутністю зон застою у ванні і западин

оброблених деталей, а також підвищенням точності регулювання кількості включень у покритті.

#### ВИСНОВКИ

1. Експериментально обґрунтовано та запропоновано до виробництва комбіновану технологію зміцнення та відновлення швидкозношуваних частин складної лісогосподарської техніки з використанням електрохімічних композиційних покриттів з подальшою мікрохвильовою або низьковольтною електротермічної обробкою.

2. Запропоновано класифікацію деталей, які підлягають реставрації КЕП з подальшою НВЧ або НВ обробкою. Встановлено зв'язок між умовами роботи деталей, їх технологічними параметрами та видом і особливостями СВЧ або НВ обробки.

3. Проведено техніко-економічну оцінку запропонованого технологічного процесу підвищення довговічності деталей КЕП з подальшою електромодифікацією в порівнянні з обробкою поверхні та КЕП без механічної обробки.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено теорію утворення КЕП та розроблено основи їх електротермічної обробки. Встановлено зв'язок між властивостями міцності КЕП з їх гетерогенною структурою та міцністю міжфазних зв'язків. Теоретично та експериментально показано залежність зносостійкості КЕП від типу, розміру та об'ємного вмісту ДП. Розроблено та запропоновано методики контролю умов утворення та властивостей КЕП: вмісту ДФ у КЕП методом мікротвердіння; структури матриці КЕП в частині їх дилатації; показники пружності за допомогою кінцевих елементів; оптимізація зносостійкості КЕП за встановленою шорсткістю.

2. Показано, що термічний ефект при електротермічній обробці КЕП повинен обмежуватися утворенням міцних зв'язків між ДФ і матрицею без порушення їх загальної структури. Для досягнення необхідної міцності зв'язку між компонентами КЕП необхідний електронагрів до  $0,4^*$  (наприклад, КЕП карбіду заліза-бору - до  $580...620$  °С), а вище цього може призвести до руйнування покриттів. Водночас виділення компонентів КЕП у результаті модифікації фази з меншою питомою густиною порівняно з вихідною фазою сприяє формуванню композитів із напругою стиску.

3. Проведено аналіз процесів електротермічної обробки КЕП з використанням мікрохвиль та ЛП. Для вибору режимів термообробки визначено аналітичні залежності з урахуванням особливостей гетерогенної структури КЕП. кГц), а при Р - потужність випромінювання ( $15 \dots 150$  Вт) і щільність точок обробки на поверхні деталі.

4. На прикладі залізорного карбіду КЕП експериментально встановлено, що електротермообробка супроводжується зміною електричного опору, термоЕРС, густини, міцності, зносостійкості, ВН, внутрішнього тертя та ударної в'язкості. Показано, що модифікація покриттів за допомогою НВЧ та ЛВ дозволяє підвищити їх зносостійкість у 1,5-2,5 рази та міцність на розрив у 4-5 разів порівняно з КЕП без обробки.

5. Запропоновано технологію відновлення та підвищення довговічності швидкозношуваних деталей і пристроїв лісового комплексу КЕП з подальшою мікрохвильовою або низьковольтною електротермічної обробкою. Запропоновано класифікацію деталей, що відновлюються модифікованим КЕП. Розроблено та апробовано технологічні методи відновлення КЕП ряду деталей із збільшеним терміном служби в 1,5-2,5 рази в порівнянні з покриттями без обробки і в 6-12 разів в порівнянні з серійними деталями.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карлос Г. Аналіз і проектування морських споруд. Нью-Йорк. CRC Press, 2019. 321 с.
2. Бурдейная В. М., Пащенко Е. А. Точность координированных размеров при обработке отверстий без направления режущего инструмента. *Машинобудування*, 2016, 12, С. 125–129.
3. Бурдейна В., Артюх С. Основні особливості оптимізації розмірів узгоджених отворів для різних видів обробки. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХП», 2018, 16 (1292), 16-21, doi: 10.20998/2413-4295.2018.16.03.
4. Cong WL, Xiatian Z., Deines TW. Обертова ультразвукова обробка пластикових композитів, армованих вуглецевим волокном: експериментальне дослідження температури різання. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2022, 22, 31, стор. 1516-1525, doi: 10.1177/0731684412464913
5. Livia Dana Beju, Brîndașu PD Загальний підхід до систем тримачів різальних інструментів. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2021, 9(2), стор. 12-17.
6. Klocke F., Brumm M., Staudt J. Якість і поверхня зубчастих коліс, виготовлених фрезеруванням вільної форми стандартними інструментами. Міжнародна конференція Gear, Ліон, Франція, 2014 р., стор. 26–28, doi: 10.1533/9781782421955.506.
7. Бірманн Д., Бате Т., Раутерт С. Колонкове свердління матеріалів, армованих волокном, за допомогою шліфувальних інструментів. *CIRP*, 2017, 66, стор. 175-180, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.304.
8. Гайска Гомес Ескудеро, Пабло Фернандес Де Лусіо, Хайзеа Гонсалес, Майкл Бартонь. Визначення індивідуальних різальних інструментів для обробки складних поверхонь на основі кінцевої форми поверхні. 2020 Міжнародна конференція з математики та комп'ютерів у науці та техніці (MACISE), 2020, doi: 10.1109/MACISE49704.2020.00031.
9. Хунчі Лю, Хай Лінь, Сіньюнг Мао, Бінь Лі. Оптимальна оцінка

шорсткості поверхні для точіння деталей диска з використанням комбінованої байєсівської моделі на основі процесу Гауса. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, стор. 203-210, doi: 10.1177/0954406218809116.

10. Ійнен Огур, Шахіноглу Абідін, Оздемір Мустафа, Йилмаз Волкан. Дослідження впливу параметрів різання на величину шорсткості поверхні при обробці сталі AISI 4140 методом Такучі. *Журнал Інституту науки і технологій*, 2020, 10(4), стор. 2840-2849, doi: 10.21597/jist.736802.

11. Aladwani AN, Mohamed SS, Khalil TA, Gaafer AM Вплив покриття ріжучого інструменту та параметрів різання на якість поверхні та швидкість видалення матеріалу при токарній обробці нержавіючої сталі 304. *Engineering Research Journal*, 2019, 1, 39, стор. 32-38

12. Кисель Ю.Є., Кройтору Д.М. Зносостійкість електрохімічних композиційних покриттів на основі сплавів заліза / *Інженерія поверхні та прикладна електрохімія*. том. 45 № 6, 2019, С. 461-464. Allerton Press. Джон США

13. Шепеленко І.В., Немировський Ю.Б., Артюхов А.М., Чернявський О.О. Вплив мікрорельєфу поверхні підкладки на формування ковзного плівкового покриття // *Процеси механічної обробки, машини та інструменти - 2019: Збірник наукових праць 10 Всес. -Українська науково-технічна конференція з міжнародною участю, Москва. Житомир, 2019. - С. 206-208. <https://conf.ztu.edu.ua/wpcontent/uploads/2019/11/206.pdf>*

14. Шепеленко І.В., Цеханов Ю.О., Немировський Я.Б. та ін. Дослідження мікрорізання в процесі фінішної обробки методом безтертової неабразивної обробки // *Передові технології в машинобудуванні – 2020: Збірник наукових праць ІХ міжнародної науково-технічної конференції 3-7 лютого, Львів – Плай, 2020. – С.162-164.*

15. Шепеленко І.В., Немировський Ю.Б., Цеханов Ю.О. Особливості деформаційного витягування матеріалів з низькою пластичністю // *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів і систем (КЗЯТПС -*

2020): Матеріали тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції 23-24 вересня, Чернігів: ЧНТУ, 2020. - Вип. 3. – Стор. 9-11.<http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/20975?locale-attribute=uk>

16. Шепеленко І. В., Немировський Ю. Б., Цеханов Ю. О. та ін. Допитання оцінки якості обробки деталей холодним пластичним деформуванням за показниками пластичності. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020» (8-12 вересня 2020 р.), Вип.6. – Херсон: ХНТУ, 2020. С. 163–166.

17. Шепеленко І.В., Немировський Ю.Б., Посвятенко Є.К. Інтенсифікація процесу нанесення антифрикційних покриттів/ І.В.Шепеленко, Я.Б. // Передова техніка, технології та інженерна освіта: Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції (6-9 жовтня 2020 р.), Київ, КПІ, 2020. С. 94–96.

18. Саленко О.Ф., Шепеленко І.В., Будар Мохамед Р.Ф. Формування алмазовмісних шарів на робочих поверхнях інструменту // Інженерія поверхні та відновлення виробів: Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції 01-05 червня 2020 р. – Київ: АТМ України, 2020. С.100-103.<https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb2-20ss.pdf>

19. Будар Мохамед Р. Ф., Шепеленко І. В. Формування поверхонь та їх властивості в деталях з композиційних матеріалів і металів // Молодь і сільськогосподарська техніка в 21 столітті: матеріали 16-го Міжнародного молодіжного форуму (25-26 березня 2020 р.). Харків, 2020. С.45.<https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/10925>

20. Шепеленко І. В., Дреєв О. М., Будар Мохамед Р. Ф. Визначення якості металевих покриттів // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в агропромисловості». Інноваційні розробки в агросекторі (7-8 травня 2020 р.). Том 2. – Харків: ХНТУСГ, 2020. С.298-

299.[https://www.academia.edu/43166158/Materials\\_МНПК\\_Молодь\\_и\\_техничес](https://www.academia.edu/43166158/Materials_МНПК_Молодь_и_техничес)

21. Саленко О.Ф., Шепеленко І.В., Будар Мохамед Р.Ф. Підвищення ефективності обробки композиційних матеріалів гібридним інструментом// Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Підвищення надійності машин і обладнання». Підвищення надійності машин і обладнання», 15-17 квітня 2020 р. – Кропивницький: НТУУ, 2020. С. 107 – 109.<http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10203>

22. Шепеленко І. В., Черкун В. В., Гуцул В. Ю. Підвищення ефективності неабразивної обробки поверхні // Матеріали I Всеукр. Науково-практичні Інтернет-конференції (01 – 30 вересня 2020 р.), Мелітополь, ТДАТУ, 2020. Стр. 35 – 38. <http://www.tsatu.edu.ua/tkm/wpcontent/uploads/sites/11/shepelenko.-materialy-konferenciyi.pdf>

23. Шепеленко І.В., Немировський Ю.Б., Красота М.В. Дослідження пластичності малопластичних матеріалів // Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту: Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції (11-13 листопада 2020 р.), м. Кременчук, зб. КрНУ, 2020. С. 56-57.<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2021/paper/view/13174>

24. Шепеленко І.В., Немировський Я.В., Медведьєва О.В. та ін. Ресурсозберігаюча та екологічно чиста технологія нанесення антифрикційних лаків. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів і систем (КЗЯТПС – 2021) : матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції (26-27 травня 2021 р.) : у 2-х томах. – Чернігів, 2021. – Том 1. Стр. 28-29. <https://conferencechernihiv-polytechnik.com/materiali-konferentsiyi/kzyatps-2021/>

25. Ваховський Д.Д., Шепеленко І.В., Красота М.В. Стан та перспективи використання біопалива на автомобільному транспорті // Матеріали IX міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (14-15

квітня 2021 р.) , Вінниця: ВНТУ, 2021. С. 35 – 45.<http://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2021.pdf>

26. Красота М.В., Шепеленко І.В., Осін Р.А. Огляд методів підвищення ефективності систем охолодження автомобільних двигунів // Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (14-15 квітня 2021 р.) , Вінниця: ВНТУ, 2021. С.160 – 162.<http://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2021.pdf>

27. Шепеленко І. В., Цеханов Ю. О., Немировський Я. Б. та ін. Дослідження пластичності чавуну в умовах повного стиснення. Перспективи розвитку машинобудування і транспорту – 2021: Збірник тез доповідей ІІ Міжнародної науково-технічної конференції (13-15 травня 2021 р.), Вінниця, 2021. С. 106-107.

28. Медведєва О. В., Немировський Ю. Б., Тунік Т. М., Шепеленко І. В. Оцінка стану довкілля є основою екологічної безпеки довкілля. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2021» (7-10 вересня 2021 р.), Вип.7. – Херсон: ХНТУ, 2021. С.266–269.

29. Красота М.В., Шепеленко І.В., Осін Р.А. Ресурсозберігаючі технології відновлення деталей автомобіля. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2021» (7-10 вересня 2021 р.), Вип.7. – Херсон: ХНТУ, 2021. С.84–86.

30. Шепеленко І.В., Черкун В.В. Підвищення ефективності обробки вузлів шворнів шестерень гідронасосів. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2021» (7-10 вересня 2021 р.), Вип.7. – Херсон: ХНТУ, 2021. С. 109–112.

31. Шепеленко І.В., Красота М.В., Вароума Аріфа. Обладнання для ремонту гільз циліндрів // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Підвищення надійності та ефективності машин, процесів і

систем», 14-16 квітня 2021 р. – Кропивницький: НТУУ, 2021. С.44.

32. Шепеленко І.В., Артюхов А.М. Ефективність застосування безфрикційної неабразивної обробки деталей мобільних сільськогосподарських машин // Збірник тез VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи та тенденції розвитку конструкцій і технічного обслуговування сільськогосподарських машин. та інструменти» (06.04.2022). – Житомир: ЖАФК, 2022. С.6 – 8. [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/zbirnik\\_tez\\_zhitomir\\_2022\\_1653410343\\_0\\_0.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/zbirnik_tez_zhitomir_2022_1653410343_0_0.pdf)

33. Шепеленко І. В., Красота М. В. Сучасні технології відновлення деталей автомобілів. Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту: Матеріали X міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції (14-15 квітня 2022 р.), Вінниця: ВНТУ, 2022. С. 325–328.

34. Шепеленко І. В., Гуцул В. І., Магопець М. С. Особливості розрахунку напружено-деформованого стану покриттів ковзання// Комплексний контроль якості технологічних процесів і систем (КЗЯТПС – 2022): матеріали XII міжнародної науково-практичної конференції (26-27 трав. 2022): у 2 томах. – Чернігів, 2022. – Том 1. МІТ. 104 - 105. <https://conferencechernihiv-polytechnic.com/materiali-konferentsiyi/kzyatps-2022/>

35. Красота М.В., Шепеленко І.В., Осін Р.А. Огляд методів діагностики форсунок бензинових двигунів// Матеріали 4 Міжнародної науково-практичної конференції «Підвищення надійності та ефективності машин, процесів і систем», 13-15 квітня 2022 р. – Кропивницький: НТУУ, 2022. С. 151 – 153. <https://www.kntu.kr.ua/doc/science/zahody/vikl/2022/12-progr.pdf>

36. Красота М.В., Шепеленко І.В., Осін Р.А. Діагностичні ознаки несправності механічних передач та їх акустичні прояви// Матеріали 4 Міжнародної науково-практичної конференції «Підвищення надійності та ефективності машин, процесів і систем», 13-15 квітня 2022 р. – Кропивницький: НТУУ, 2022. С. 154 –

156. <https://www.kntu.kr.ua/doc/science/zahody/vikl/2022/12-progr.pdf>

37. Шепеленко І.В., Посвятенко Є.К. Створення нових методів інженерії поверхні деталей машин і механізмів// Матеріали 4-ї міжнародної науково-практичної конференції «Підвищення надійності та ефективності машин, процесів і систем», 13-15 квітня 2022 р. – Кропивницький: НТУУ, 2022. С. 135 – 136. <https://www.kntu.kr.ua/doc/science/zahody/vikl/2022/12-progr.pdf>

38. Посвятенко Є.К., Немировський Ю.Б., Шепеленко І.В. Конструкція камер згоряння некерованих твердопаливних ракет// Поверхнева техніка та оновлення продукції: Матеріали 22-ї міжнародної науково-технічної конференції, 15-16 червня 2022 р. – К.: АТМ України, с. 2022. С. 100 – 101.

39. Магопець М.С., Шепеленко І.В. Метод інженерії поверхні на основі деформуючого волочиння // Молода наука – Робототехніка та нанотехнології сучасного машинобудування: Збірник наукових праць міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, 20 червня 2022 р. – Краматорськ: ДДМА, с. 2022. С. 121 – 123.

40. Магопець М. С., Шепеленко І. В. Технологічні методи технології поверхні// Технологія обслуговування та нові матеріали в машинобудуванні: матеріали І Всеукраїнської інтернет-конференції (10-11 лютого 2022 р.). Харків, 2022. С. 10-12. <https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/161/1/Servisna%20inzheneriya%20ta%20novi%20materili%20v%20machinobuduvanni-10-12.pdf>

41. Шепеленко І. В., Магопець М. С. Системний підхід до проектування технологічного процесу відновлення деталей// Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали та програма Х Всеукраїнської науково-технічної конференції (18-21 квітня 2023 р.). М. Суми, 2023. С.53. <https://conf.teset.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/stpv-2023.pdf>

42. Шепеленко І.В., Магопець М.С. Загальна структура

технологічного процесу відновлення деталей машин// Молода наука – робототехніка та нанотехнології сучасного машинобудування: збірник наукових праць міжнародної молодіжної науково-технічної конференції 12-14 квітня 2023 р. – Краматорськ Тернопіль: ДДМА, 2023. С. 290 – 293.

43. Красота М.В., Шепеленко І.В., Осін Р.А. Підвищення ефективності роботи автомобільних двигунів з використанням теплозахисних покриттів // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку автомобільного транспорту» (13-14 квітня 2023 р.), Вінниця: ВНТУ, 2023. С.3197 – 199.

44. Шепеленко І.В., Сторчак М.Г., Немировський Ю.Б. Ресурс пластичності чавуну при його обробці деформаційним витягуванням // Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «Підвищення надійності та ефективності машин, процесів і систем», 19-21 квіт. 2023. – Кропивницький: НТУУ, 2023. С. 152 – 154. [https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/materiali\\_konf.\\_pnemps-2023.pdf](https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/materiali_konf._pnemps-2023.pdf)

45. Пермяков О.А., Черновол М.І., Шепеленко І.В., Немировський Ю.Б. Технологічне проектування процесів відновлення деталей методами, що забезпечують підвищення якості поверхневого шару // Інформаційні технології: наука, техніка, технології, освіта, здоров'я: Тези доповідей. XXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD2023, 17-20 травня 2023 р. – Харків: НТУ. –ХП”, 2023. С.192. [http://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Zbirnik-tez-MicroCAD2023-new\\_compressed-1.pdf](http://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2023/05/Zbirnik-tez-MicroCAD2023-new_compressed-1.pdf)

46. Михайло Черновол, Ігор Шепеленко, Сергій Магопеч. Відновлення та зміцнення деталей машин зносостійкими покриттями// Матеріали і технології в машинобудуванні (МТІ-2023): Машинобудування, матеріали, технології, транспорт: збірник наукових доповідей міжнародної конференції, 16-18 травня 2023 р. – Луцьк: Вежа-Друк, 2023. С. 264–266 с.

47. Пермяков О.А., Шепеленко І.В., Пшемислав Йозькович. Технологічне проектування процесів відновлення деталей та зворотного інжинірингу // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів і

систем (КЗЯТПС – 2023) : матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції (25-26 травня 2023 р.) : у 2-х томах. – Чернігів, 2023. – Том 1. МІТ. 218 - 219.

<https://drive.google.com/file/d/1xuW35h8W5s5MuzPfaF6hZrrSfVwuhDr/view?pli=1>

48. Шепеленко І.В., Немировський Ю.Б., Магопець С.О., Красота М.В. Проведення прискорених випробувань на зношування гільз циліндрів // Комплексний контроль якості технологічних процесів і систем (КЗЯТПС – 2023): матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції (25-26 травня 2023 р.). ): у 2 томах. – Чернігів, 2023. – Том 1. МІТ. 110 - 112. <https://drive.google.com/file/d/1xuW35h8W5s5MuzPfaF6hZrrSfVwuhDr/view?pli=>