

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра галузевого машинобудування**

Пояснювальна записка

до *дипломної роботи* на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»  
на тему: «Дослідження технологій лазерного зміцнення поверхонь деталей  
машин»

Виконав: здобувач вищої освіти за  
освітньо-професійною програмою  
Технології і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва  
спеціальності 208 Агроінженерія  
ступеня вищої освіти «*магістр*» групи 5  
Подленко Антон Романович  
Керівник: Ветохін В. І.  
Рецензент: Шейченко В. О.

**Полтава – 2021 року**

## ВСТУП

Оснащення сільськогосподарського виробництва України сучасною сільськогосподарською технікою потребує удосконалення ремонтної бази при проведенні її технічного обслуговування і ремонту. Застосування нових, більш ефективних технологій, матеріалів дозволяє підвищити надійність сільськогосподарських машин в процесі їх експлуатації.

В господарствах після капітального ремонту знаходиться в експлуатації більше 50% тракторів, 60 % комбайнів, 75% двигунів, що призводять до високої потреби в ремонтно-обслуговуючому виробництві [1,2].

При відновленні сільськогосподарської техніки використовується велика кількість запасних частин, які в значній мірі підвищують вартість ремонтних робіт. Тому відновлення зношених деталей буде сприяти зниженню вартості їх ремонту. Практика показує, що ресурс відновлених деталей досягає ресурсу нових, а їх вартість на 40 -50 % нижче [3].

Раціональні технології відновлення деталей дозволяють скоротити до 10% часу на технічне обслуговування і ремонт, на 22...25% збільшити напрацювання на трактор і на 30...45% підвищити його продуктивність [4].

В сучасному ремонтному виробництві значна роль відводиться наплавленню, як ефективному способу відновлення зношених деталей. Питома вага зварювально-наплавочних процесів, в загальному об'ємі відновлення деталей становить 75 – 80 % [5].

Питання розробки і використання таких технологій в практиці ремонтного виробництва присвячені роботи групи вчених, в тому числі Дорожкіна Н.Г. [6], Молодика Н.В. [7], Мажейка О.Й. [8], Черновола М.І. [9], Черноіванова В.І. [10] та ін.

Важливим резервом підвищення довговічності деталей сільськогосподарської техніки є використання ефективних технологічних процесів відновлення зношених їх поверхонь на базі використання концентрованих джерел енергії. Тому проведення досліджень особливостей

лазерного впливу на матеріали деталей при їх відновленні є актуальною задачею в ремонтному виробництві.

Лазерне наплавлення досить широко використовується в машинобудуванні, як ефективний спосіб покращення експлуатаційних характеристик робочих поверхонь деталей машин [11]. Разом з тим воно ще не отримало широкого застосування в ремонтних підприємствах. Це пояснюється відсутністю достатніх даних про зв'язки параметрів фізико-хімічних процесів при наплавленні з характеристиками лазерного зміцнення, а також відсутні розробки технологій лазерного наплавлення конкретних деталей сільськогосподарської техніки при відновленні.

Тому дослідження, які направлені на створення технології лазерного наплавлення вітчизняних деталей сільськогосподарських машин, є актуальними [12].

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 1.1. Аналіз методів наплавлення при відновленні деталей сільськогосподарських машин

Більшість деталей сільськогосподарських машин працюють в умовах високих динамічних навантажень, що викликає підвищений їх знос. Зазвичай для відновлення таких деталей використовують метод наплавлення. Це пов'язано з необхідністю нанесення невеликого шару компенсуючого матеріалу на зношену поверхню.

Існуючі способи відновлення деталей, що працюються умовах контактних напружень показані на рис. 1.1.

Проведені дослідження [13,14] показують основні вимоги до відновлювальних деталей сільськогосподарських машин: забезпечення високої міцності зчеплення між матеріалом деталі і наплавленим, достатні фізико-механічні властивості матеріалу, що наноситься (зносостійкість, контактна витривалість, низькі внутрішні напруги).

Характеристика методів відновлення деталей приведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристика методів відновлення [15]

Метод відновлення	Глибина дефектного шару, мм
<b>Металізація</b>	
Плазмо-дугова	0,05 – 0,10
Електродугова	0,5 – 1,0
Газова	0,05 – 0,10
<b>Наплавлення</b>	
Електродугове під шаром флюсу	0,2 – 0,5
Порошковими дротами	1,2 – 2,4
В середовищі захисних газів	0,44 – 0,8
Електроімпульсне	0,2 – 0,4

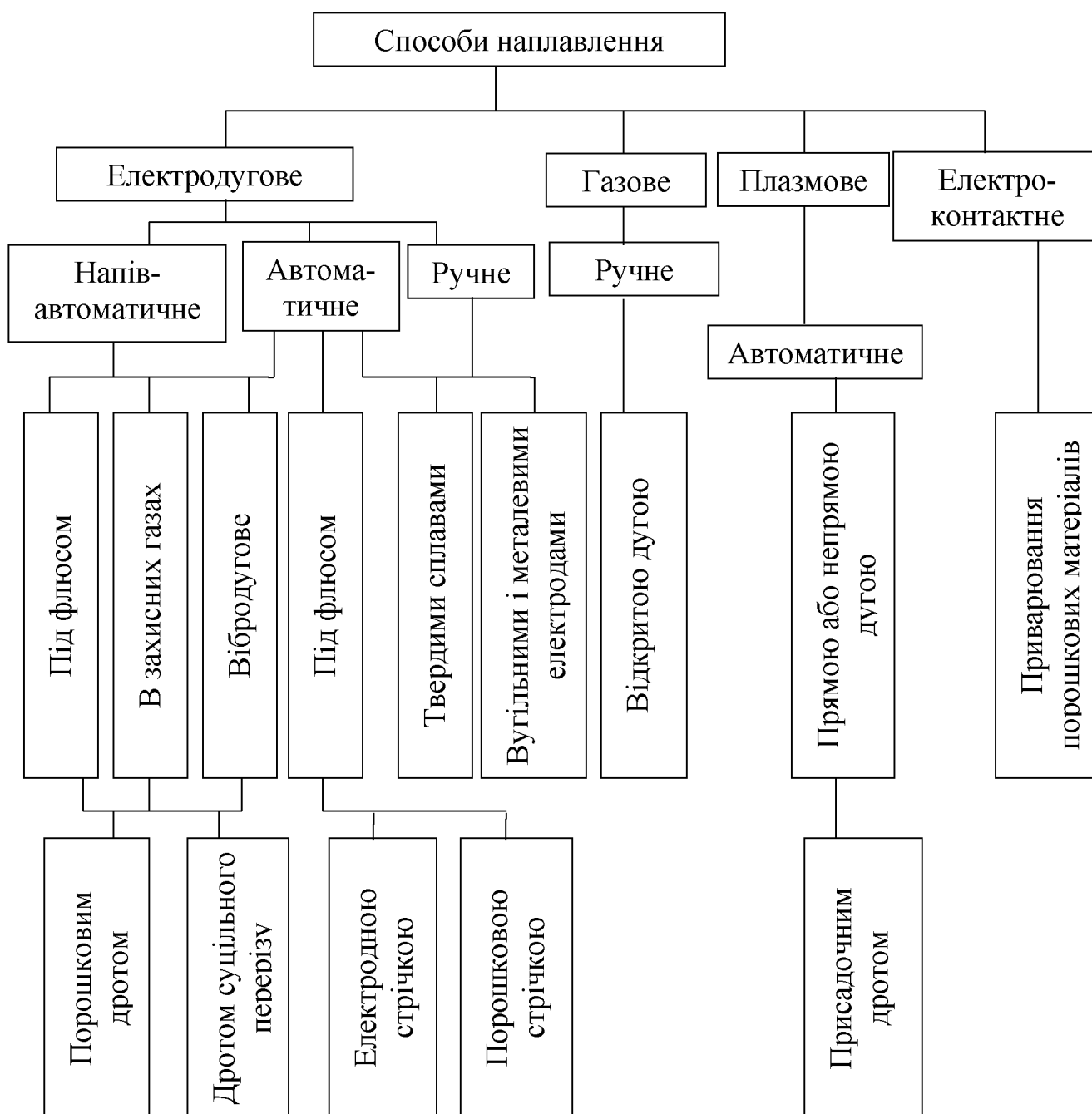


Рисунок 1.1 – Класифікація способів відновлення деталей сільськогосподарської техніки

Вібродугове	0,2 – 0,5
Ручне (електродами)	0,5 – 1,0
Плазмове	0,1 – 0,3
Газове	0,25 – 0,5
Електрошлакове	1,0 – 2,0
Лазерне	0,05 – 0,15
Електролітичне осадження	
Хромування	0,03 – 0,05
Нікелювання	0,02 – 0,03
Залізнення	0,03 – 0,05
Нанесення полімерних матеріалів	
Напилення	0,35 – 0,7
Лиття під тиском	0,15 – 0,21

Перспективним є використовуваний в промисловості метод зміцнення деталей лазерною обробкою поверхонь деталей [16].

Існує необхідність в аналізі можливостей використання лазерної обробки для відновлення деталей сільськогосподарської техніки, які експлуатуються в умовах високих контактних навантажень.

## **1.2. Метод лазерного наплавлення**

Лазерна обробка деталей машин є новим розвиваючим напрямком технології машинобудування та інших галузей машинобудування.

Серед інших методів зміцнення лазерне наплавлення знаходить все більш широке використання як в агропромисловості, так і в ремонтному виробництві [17].

Сутність процесу лазерного наплавлення заключається в нанесенні на поверхню деталі наплавленого матеріалу або подачі його в зону дії лазерного променя з наступним оплавленням [18].

Нанесення матеріалу може бути здійснено застосуванням наступних фізичних процесів (електролітичне осадження, газополуменеве, плазмове напилення або подачі в зону дії лазерного променя стрічки, дроту або порошку за допомогою транспортуючого газу) [19].

Враховуючи велику можливість способів подачі матеріалу, до теперішнього часу найбільше розповсюдження отримує лазерне наплавлення із застосуванням порошкових матеріалів і нанесенням їх на деталь або в вигляді обмазки [20], або подачею транспортуючого газу (газопорошкове лазерне наплавлення).

Перевагою метода обмазок є: можливість нанесення матеріалу на важкодоступні ділянки поверхні деталі; стабільний і рівномірний коефіцієнт поглинання лазерного випромінювання; порівняно легка підготовка деталі до наплавлення. Разом з тим даний метод має ряд недоліків: за один прохід лазерного променя висота наплавленого валику не перевищує 0,5...0,7 мм [20].

Процес газопорошкового наплавлення отримує все більше розповсюдження за рахунок високої продуктивності. Формування валику розплаву при цьому процесі проходить шляхом поступового нарощування шару від основи до поверхні.

Недоліком цього технологічного процесу лазерного наплавлення є великі втрати порошків.

В роботі [19] приводяться затрати питомої енергії при наплавленні валику  $1 \cdot 10^{-3}$  м, і складають  $(30 \dots 50) \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>.

Щоб наплавлений шар мав високі експлуатаційні характеристики, необхідно застосовувати матеріали із заданим хімічним складом. При лазерному наплавленні використовують матеріали, які мають однаковий гранулометричний склад, що забезпечує хорошу сипучість порошку і

постійну його витрату. При лазерному наплавленні особливе значення має технологічність процесу і низька вартість порошків.

В залежності від гранулометричного складу порошки виготовляють чотирьох класів: крупний (К), середній (С), мілкий (М), і дуже мілкий (ОМ) системи нікель-хром-кремній-бор. Із них отримують порошок сфероїдальної форми, які мають хорошу текучість, що дозволяє стабілізувати процес наплавлення, підвищити коефіцієнт використання матеріалу, покращити якість наплавленого шару.

Вказані сплави мають інтервал плавлення ( $950 - 1150^{\circ}\text{C}$ ), що дозволяє отримати наплавлений шар заданих об'ємів і хороший дифузійний стан зчеплення шару з основою з межею міцності на відрив вище  $50 \text{ кг/мм}^2$  і твердістю покриття до 62 HRC [21, 22].

В технологіях лазерного наплавлення використовують порошкоподібні наплавочні суміші: УС-25, КБХ, ФБХ6-2, використання яких дозволяє підвищити твердість покриття до HRC 55, а зносостійкість - в 3...7 раз.

В США випускають порошки С395 і С495, що забезпечують високу стійкість до абразивного зношування і корозії, але мають зниження опору до ударних навантажень.

В Німеччині виготовляють гранульовані порошки Fe-Cr-C-B-Si сплаву марки МРА550 (тип 400Х40Р2С), призначений для покриття на деталях, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування. Покриття мають твердість HRC 60-65 і високу зносостійкість, але знижений опір ударам і підвищену здатність до утворення тріщин.

Для реалізації вказаних методів лазерної обробки використовують лазери, що мають необхідні енергетичні характеристики випромінювання для взаємодії з матеріалами і працюючі на вуглекислому газі ( $\text{CO}_2$ ), рубін, скло, алюмо-ітрійовому гранаті (АІГ). Останні можуть працювати як в імпульсному, так і в неперервному режимі (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Основні параметри імпульсно-непереривних лазерів на АІГ

Тип лазеру	Довжина хвилі, мкм	Потужність випромінювання, Вт	Витрата випромінювання, мрад	Вага установки, кг
1.ЛТН-101	1,06	63	10	200
2. ЛТН-102А	1,06	125	10	200
3. ЛТН-103	1,06	250	12	300

Найбільше використання для технологічних цілей отримали газові  $\text{CO}_2$  – лазери, що працюють на вуглекислому газі з добавками азоту і гелію, основні параметри яких представлені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні параметри непереривних технологічних  $\text{CO}_2$  – лазерів

Тип лазеру	Потужність випромінювання, Вт	Неестабільність випромінювання, %	Витрата випромінювання, мрад	КПД, %	Витрата газу, $\text{м}^3$	Споживана потужність, кВт
1. ЛГН-702 «Кардамон»	0,8	3-10	3,0	8-10	0,12	10
2. Комета	1,2	2-5	3,0	10-15	0,16	30

Крім джерела лазерного випромінювання в технологічному ланцюгу необхідні наступні елементи: відсікач випромінювання (заслінка), вимірювач потужності лазерного випромінювання, промінепроводи, фокусуєча оптика, технологічні модулі (стінки) для маніпуляцій з обробляючими деталями [23].

### **1.3. Використання лазерного наплавлення для зміцнення відновлювальних деталей машин**

В промисловості лазерне наплавлення самофлюсуючими нікелевими порошками використовується при відновленні деталей гідроапаратури, а також крупномодульних зубчастих передач [24].

Лазерне газопорошкове наплавлення знайшло відповідне використання для відновлення і зміцнення робочих фасок клапанів автомобільних двигунів.

Наплавлення порошкового сплаву ПНЧ-3Л виконувалося на пошкоджену різьбу деталей із сталі 20ХН. Результати експлуатаційних випробувань показують високу зносостійкість таких деталей.

Маються дані відновлення бронзових третюв частин обертаючих деталей лазерним порошковим наплавленням [23]. Технологічний процес наплавлення забезпечує потрібну якість і міцність зчеплення. Термін служби деталей підвищується в 1,5...2 рази.

Метод лазерного оплавлення газопорошкових покриттів використовується для відновлення деталей нафтового обладнання. В якості напилюваного матеріалу використовувались порошки типу ПГ-СР3 і ПГ-СР4. Оплавлення виконувалось лазером ЛГН-702, потужність лазерного випромінювання 0,8 кВт.

Структура поверхневих шарів покриттів після лазерного опромінення при оплавленні зберігає дрібнодисперсну будову з рівномірним розподілом кристалів зміцнюючих фаз в перенасиченому розчині на основі нікелю. Ресурс відновлених деталей підвищується в 3...3,7 рази в порівнянні з методом без лазерного оплавлення.

Аналіз літературних джерел показав, що лазерне оплавлення нанесених покриттів значно підвищує якість робочих поверхонь і ресурс деталей. Однак, поряд з перевагами даний метод ускладнює технологічні процеси

відновлення деталей, підвищує їх вартість, що часто обмежує використання метода при зміцненні і відновленні деталей сільськогосподарської техніки.

### **Висновки, мета і завдання досліджень**

На основі проведеного огляду і аналізу робіт вітчизняних і закордонних досліджень в області використання лазерної обробки, а також досвіду машинобудівельних підприємств, ремонтного виробництва, можна зробити наступні висновки:

1. Серед групи методів наплавлень лазерне наплавлення досить перспективне при відновленні деталей сільськогосподарської техніки, що працюють в умовах динамічних навантажень, більш контактних напруг.
2. Для підвищення експлуатаційних характеристик відновлювальних деталей, зниження собівартості даного технологічного процесу потрібно оптимізувати режими лазерного наплавлення, що дозволить підвищити продуктивність і якість ремонту.

В відповідності із викладеними висновками, метою роботи є підвищення довговічності деталей сільськогосподарської техніки при відновленні лазерним наплавленням порошковими сумішами.

Для досягнення поставленої мети в даній роботі поставлені наступні завдання:

- а) Дослідити процес лазерного наплавлення і обґрунтувати можливість його використання для відновлення деталей сільськогосподарської техніки.
- б) Встановити основні технологічні параметри лазерного наплавлення.
- в) Дослідити структуру і фізико-механічні властивості наплавленого матеріалу.
- г) Дати оцінку довговічності відновлених деталей, розробити практичні рекомендації до впровадження технології лазерного наплавлення в ремонтному виробництві.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА І ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1. Матеріали та обладнання для лазерного наплавлення

Більшість деталей сільськогосподарської техніки виготовляється із якісних вуглецевих сталей. Експериментальні дослідження проводились на зразках зі сталі 45. Для підвищення якості наплавлених шарів використовувались порошкові наплавочні суміші на нікелевій і залізній основі, в склад яких вводився алюміній. Порошок для наплавлення на поверхню зразків наносився способом обмазки, в якій в якості зв'язуючого компоненту використовувався клей на целюлозній основі. Він вигорає при температурі 300...400°C і не впливає на хімічний склад наплавленого шару. Даний клей добре наноситься на поверхню і значно покращує проникаючу властивість обмазки.

На обезжирену поверхню деталі наноситься клей і виконується подача порошку із бункеру (рис. 2.1).

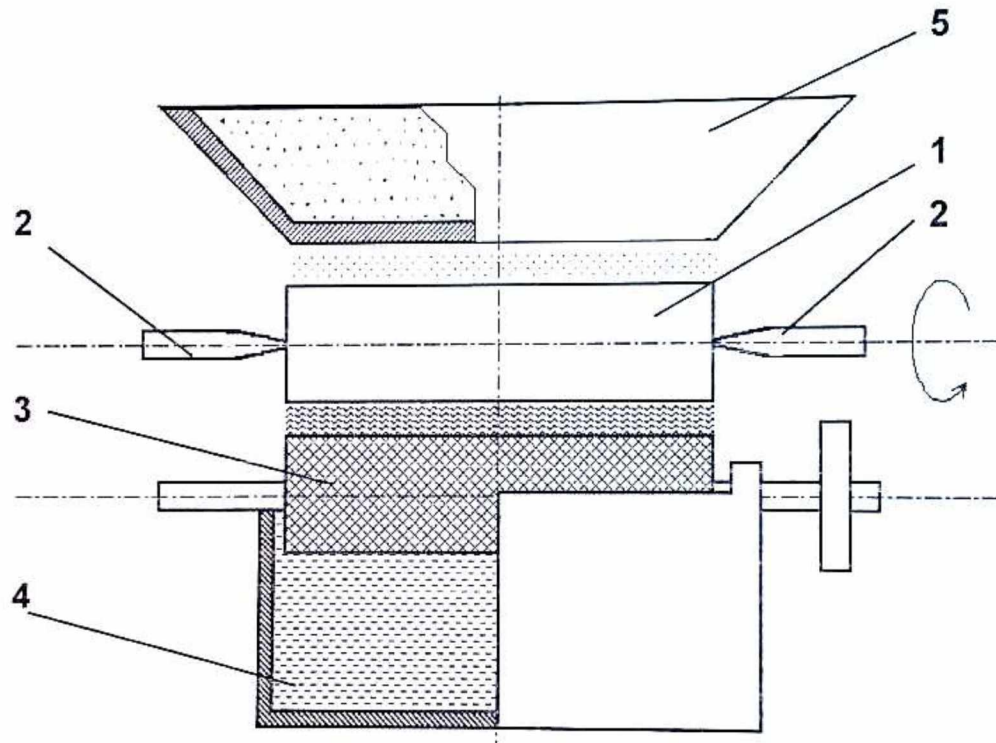
Лазерне наплавлення виконувалося на експериментальному лазерному технологічному комплексі (ЛТК), що включає: лазерну установку, оптичний блок, технологічний модуль (рис.2.2).

В якості лазерної установки використовувався лазер «Іглан» потужністю випромінювання до 2,5 кВт. Цей лазер має більш просту конструкцію, кращу стабільність параметрів в часі.

Для транспортування лазерного променя до поверхні деталі, регульована процесом лазерної обробки використовувалася оптична схема, що складається із заслінки відсікача, лінзи, мідного дзеркала на інварній основі.

Для контролю за забезпеченням параметрів лазерної обробки використовується прибор ПІ-4 – вимірювач потужності лазерного випромінювання, що має наступні характеристики: межі вимірювань

потужності – до 5 кВт; довжина хвилі лазерного випромінювання – 0,4...11,0 мкм; приймач випромінювання представляє собою охолоджувальний конус.



1 – оброблювальна деталь;

2 – центра;

3 – обмазувальний валик;

4 – ванна з обмазкою;

5 – бункер з порошком

Рисунок 2.1 – Принципова схема нанесення обмазки на відновлювальну деталь

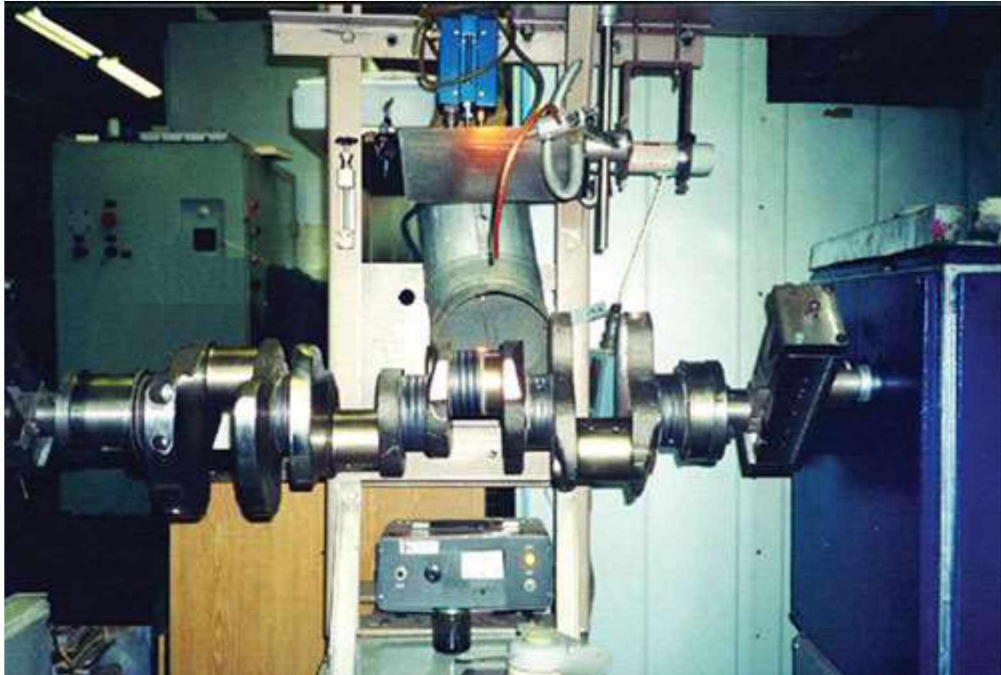


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд експериментального лазерного технологічного комплексу

## **2.2. Методика дослідження структури, складу і властивостей покрить лазерним наплавленням**

Наплавлення валиків виконувалося по схемі (рис. 2.3).

Дослідження структури дозволяє визначити розміри, розташування зерен металу, проконтролювати стан структури поверхневого шару деталі, а також виявити мікрodefekти (дрібні тріщини, раковини).

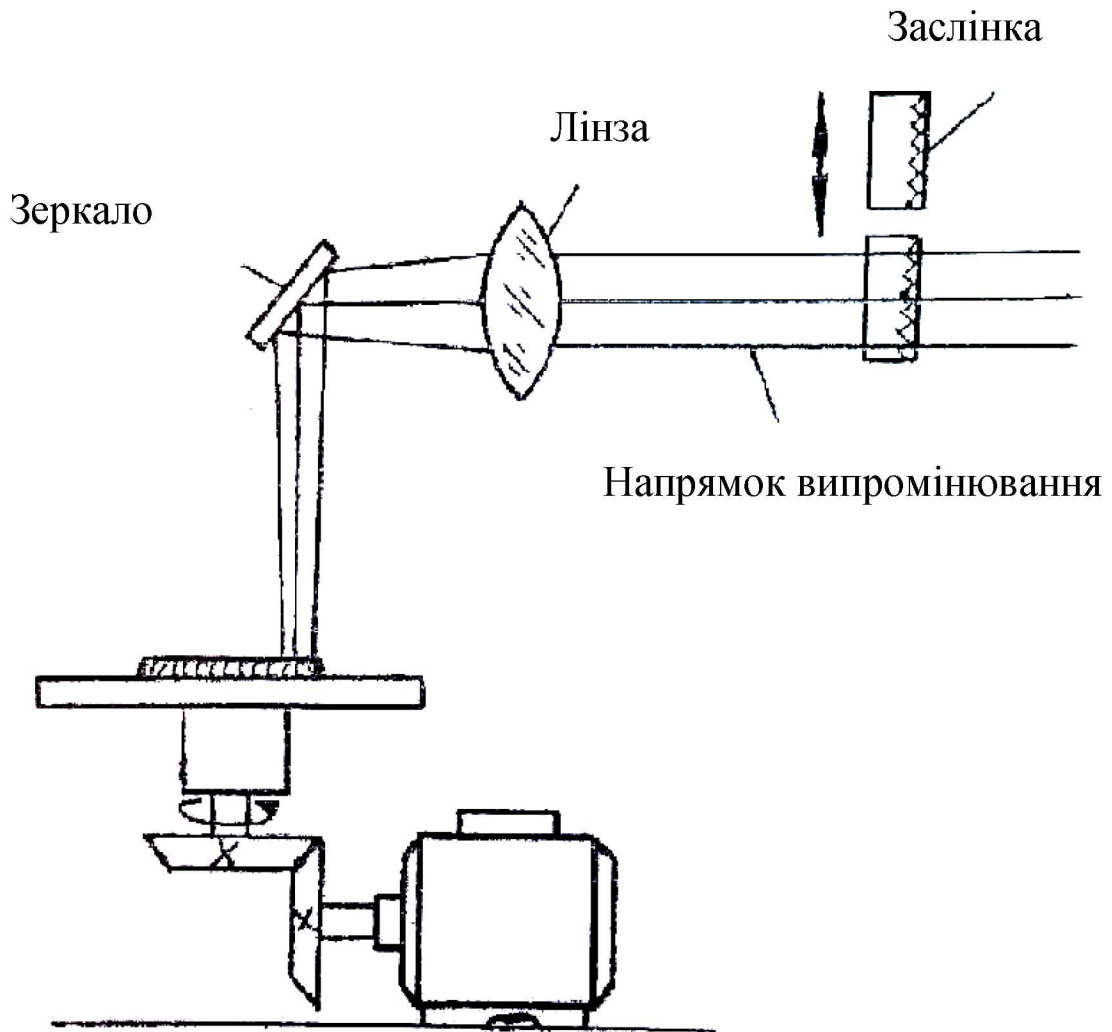


Рисунок 2.3 – Схема лазерного наплавлення одиничного колового валика

Мікроструктура досліджуваних зразків вивчалася за допомогою металографічного мікроскопу МІМ-8М при збільшенні до 1000 раз.

Із зразків вирізалися шліфи абразивним дисковим колом при сильному охолодженні. Шліфи поміщалися в металеві обойми і заливалися етакрилом.

Досліджувана поверхня шліфу підлягала травленню 4%-ним розчином азотної кислоти в етиловому спирті. На мікрошліфі виявляли: структуру

наплавленого шару, основного металу і перехідної зони, а також мікроскопічні дефекти.

Твердість наплавлених шарів на зразки визначалась методом Роквела на приборі ТК-2 по шкалі С вдавлюванням алмазного конуса при навантаженні 1,5 кН.

Мікротвердість наплавленого шару вимірювалась на приладі ПМТ-3 з навантаженням на інденторі 0,5 кН.

Дослідження шорсткості поверхонь деталей виконували на профілометрі моделі 253 (рис. 2.4).

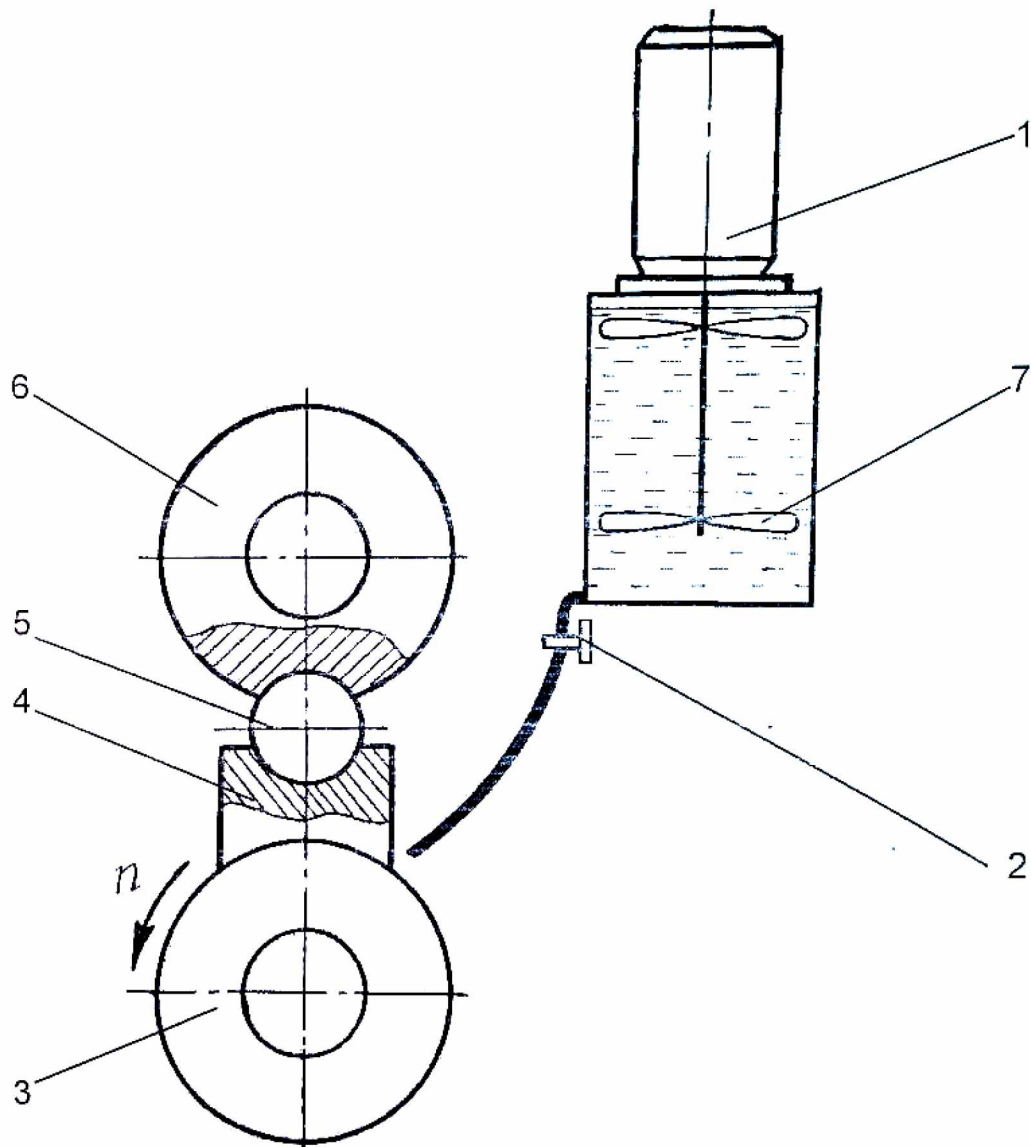


- 1 – датчик;
- 2 – привід;
- 3 – електронний блок;
- 4 – стояк;
- 5 – столик.

Рисунок 2.4 – Профілометр моделі 253

### 2.3. Методика вимірювання зносостійкості

Лабораторні дослідження на зносостійкість проводили на машині тертя СМЦ-2 по схемі «диск-колодка» (рис. 2.5).



1 – резервуар для змазувального матеріалу;

2 – дозуючий кран;

3 – зразок (диск);

4 – контрольний зразок (колодка);

5 – опорний шарик;

6 – оправка;

7 - активатор

Рисунок 2.5 – Схема проведення досліджень на машині тертя

Дослідженню підлягали зразки-диски, виготовлені із опорних шийок розподільчого валу (сталь 45, гартування СВЧ).

Лазерне наплавлення виконувалося при наступних режимах: потужність променю 1,5 кВт; швидкість обробки 1,5 хв; подача променю 1,2 мм/об. Мікротвердість наплавлених зразків складала не менше  $H_{\mu} = 8 \cdot 10^3$  МПа.

Під час досліджень за допомогою лічильника, встановленого на машині тертя, реєструвалась кількість обертів зразка (шлях тертя).

Зносостійкість оцінювалась по зміні ваги зразків в процесі досліджень. Втрату ваги визначали зважуванням до і після досліджень з точністю до 0,1 мг на аналітичних вагах ВЛА-200М.

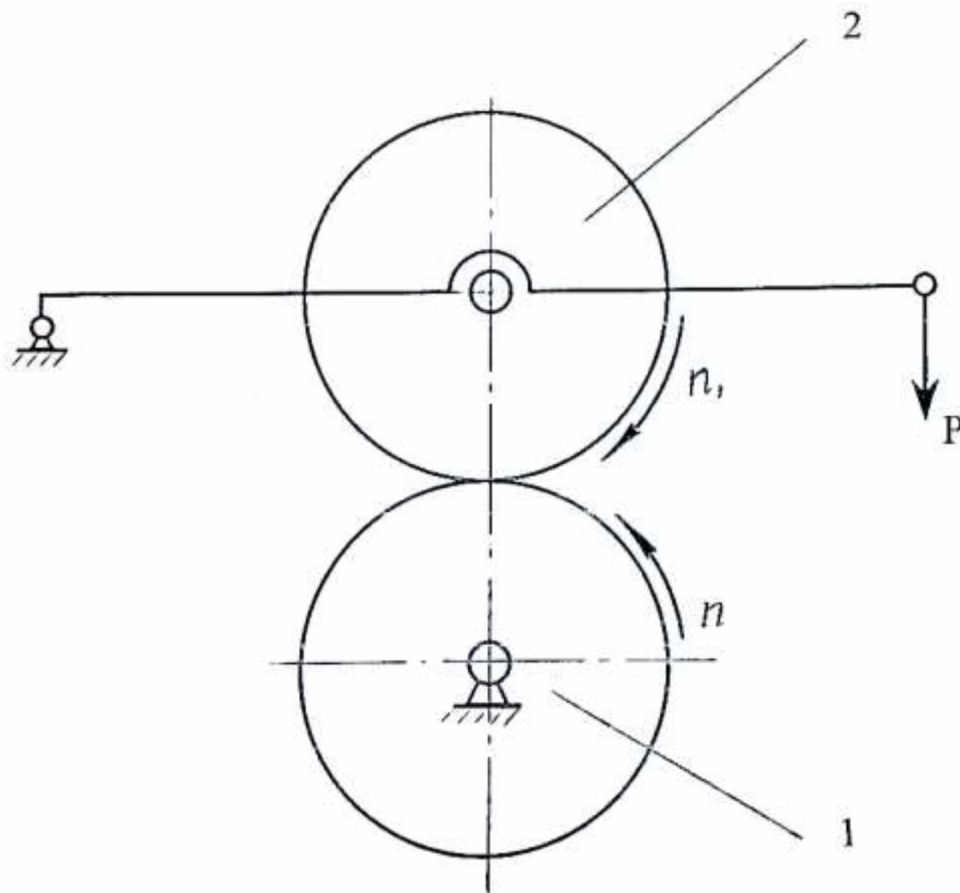
#### **2.4. Методика проведення досліджень на контактну міцність**

Робочі поверхні багатьох деталей (кулачкові вали розподільних валів двигунів внутрішнього згорання, зубчасті колеса та інші деталі) працюють при терті в умовах великих контактних навантажень і в процесі експлуатації часто руйнуються в результаті викришування.

Лабораторні дослідження на контактну міцність виконували на машині тертя СМЦ-2 по схемі «ролик-ролик» (рис. 2.6).

В процесі досліджень забезпечувалося навантаження  $P$  до 2 кН із мащенням індустриальним мастилом. Контактну міцність оцінювали по максимальній витримуючій матеріалом величині найбільшого контактного тиску.

Критерієм кінця досліджень було початок прогресуючого викришування досліджуваної поверхні ролику.



1 – зразок з наплавленою поверхнею;

2 – зразок сталь 45, СВЧ (HRC 50...54)

Рисунок 2.6 – Схема проведення досліджень на контактну міцність (машина тертя СМЦ-2, «ролик-ролик», діаметр 40 мм)

### Висновки

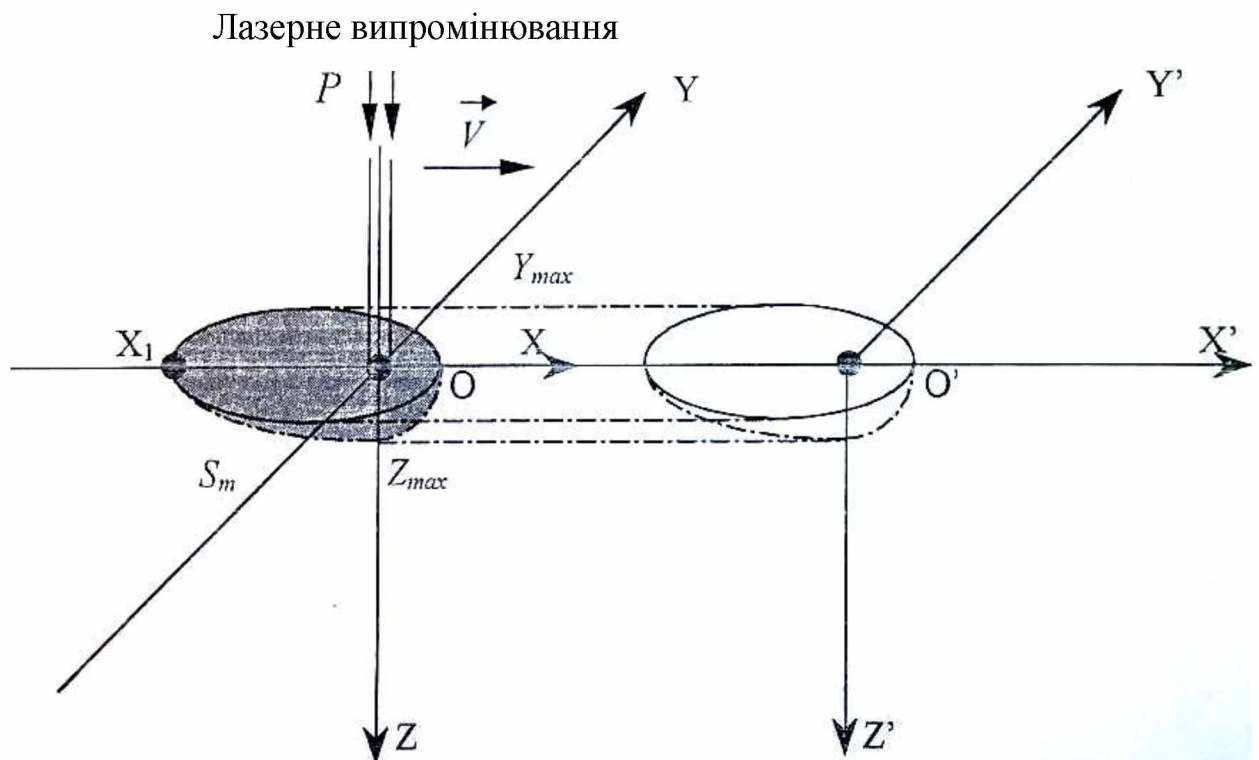
1. Розроблена методика проведення досліджень структури і властивостей лазерного наплавлення.

2. Представлена методика проведення зносостійких досліджень і досліджень на контактну міцність.

## РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ  
ДОСЛІДЖЕНЬ3.1. Теоретичні передумови зміцнення робочих поверхонь лазерним  
наплавленням

Для визначення технологічних параметрів лазерного наплавлення прийнята наступна технологічна модель процесу. На поверхні в зоні дії променя утворюється лунка рідкої фази, що переміщується разом з лазерним променем (рис. 3.1).



$S_m$  – величина площі поверхні плавлення;

$X, Y, Z$  – система координат, що пов'язана з променем (тепловим джерелом);

$X', Y', Z'$  – система координат, що пов'язана з матеріалом

Рисунок 3.1 – Схема лазерного наплавлення покриття

На рисунку схематично показана система координат лунки рідкої і твердої фази. Джерело лазерного випромінювання знаходиться в точці  $X=Y=Z=0$ .

Рівняння теплопровідності в вибраній системі координат має вигляд [25]:

$$\Delta T + \frac{v}{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (3.1)$$

де  $\Delta$  – оператор Лапласа ( $\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ );

$v$  - швидкість переміщення деталі, м/хв;

$k = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$  - температуропровідність;

$c$  – питома теплоємність, Дж/К;

$\rho$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – теплопровідність, Вт/(мК).

Максимальний радіус проплавлення  $r_{max}$  може бути визначений рівнянням [6]:

$$r_{max} = \frac{P}{2\pi\lambda T_m}, \quad (3.2)$$

де  $T_m$  - температура плавлення матеріалу, К.

Топографія поля температур в матеріалі визначається наступною залежністю:

$$T(r, z) = \frac{P}{2\pi\lambda r} \exp\left(-\frac{v(r+x)}{2k}\right). \quad (3.3)$$

Витягнутість лунки по вісі  $X$  складає:

$$X_{max} = \frac{P}{2\pi\lambda r} \left( 1 + \frac{1}{1 + Pv/2\pi\lambda T_m k} \right). \quad (3.4)$$

Враховуючи, що радіус лунки розплаву приблизно дорівнює її глибині, то глибину лунки  $Z_{max}$  можна знайти по формулі:

$$Z_{\max} = \frac{2k\omega}{\nu(1+\omega)} \sqrt{1+2\omega}, \quad (3.5)$$

де  $\omega$  - коефіцієнт, що визначається рішенням рівняння:

$$\omega = \frac{\nu}{k} \int \frac{\partial T}{\partial z} d\nu. \quad (3.6)$$

З виразу (3.4) випливає, що топографія температурного поля, швидкість охолодження матеріалу, ширина і глибина розплаву визначається співвідношенням величин  $P$  і  $\nu$ , що являються технологічними параметрами лазерного наплавлення.

### **3.2. Аналіз процесу подачі порошкових сумішей в зону лазерного наплавлення**

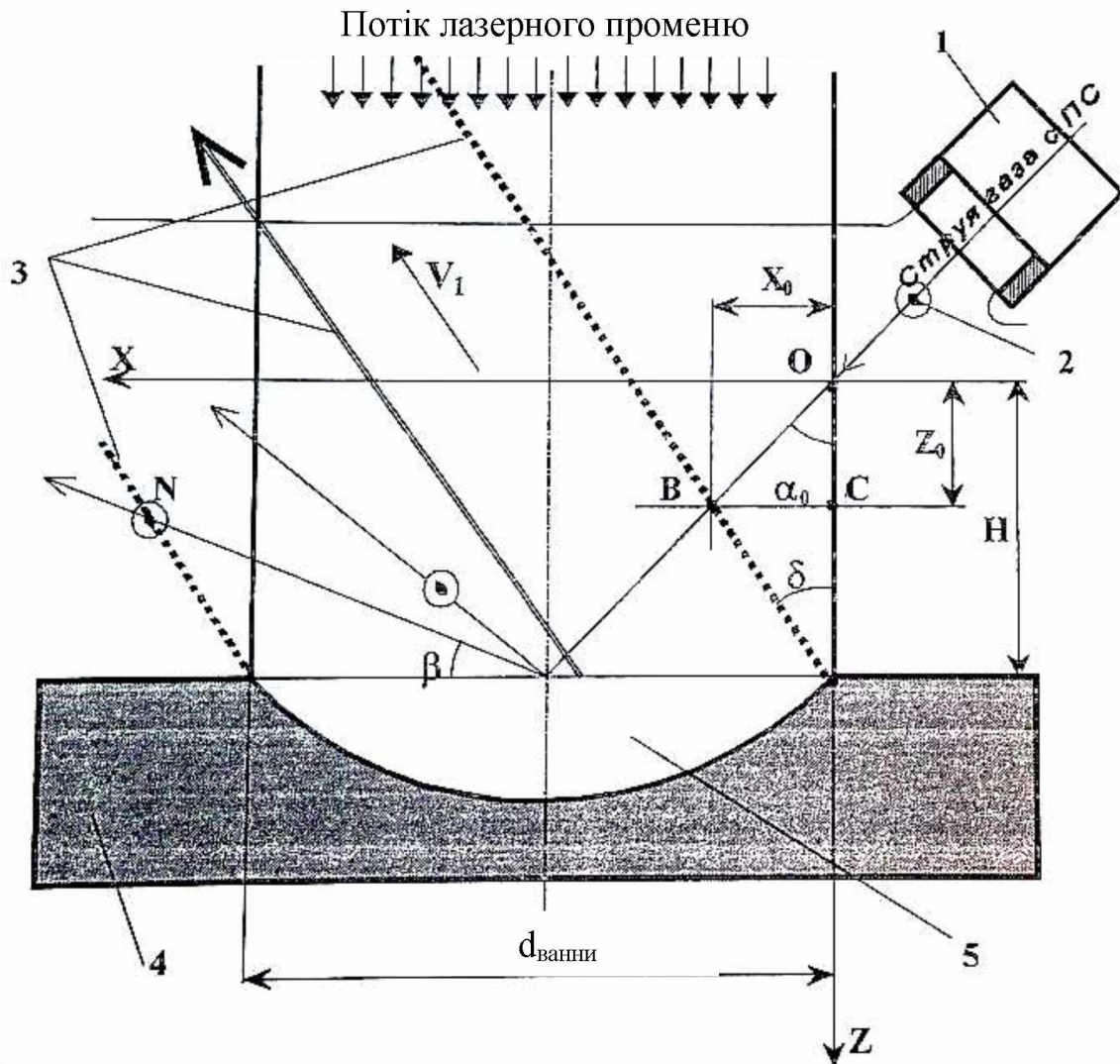
Для якісного лазерного наплавлення сумішами необхідне надійне введення порошкових частинок в зону плавлення. Це можна виконати технологічним способом подачі порошкових сумішей газом (рис. 3.2).

Надійна подача порошкових сумішей залежить від факторів, що визначають траєкторію руху частинок порошку. До них відноситься напрямок і швидкість транспортуючого газу, від яких залежить траєкторія руху порошкових сумішей в зоні плавлення, а також газодинамічні характеристики струменю парів основного металу, дія яких приводе до відхилення частинок від заданого напрямку.

Потік транспортуючого газу задає частинкам порошку прямолінійну траєкторію, що забезпечує перехід максимальної кількості порошкової суміші в розплавлений метал зварювальної ванни.

Практика примусового введення порошкової суміші в зону плавлення показує, що при лазерному наплавленні основним фактором перешкоджання переходу порошку в зварювальну ванну, є струмінь парів основного металу, який утворюється над розплавом. Це викликає відхилення частинок порошку

від початкового заданого напрямку руху, що зменшує кількість порошкових сумішей, які потрапляють в зварювальну ванну.



1 – сопло, що формує газопорошковий потік;

2 – частинка порошкової суміші;

3 – струмінь парів основного металу;

4 – основний метал;

5 – зварювальна ванна.

Рисунок 3.2 – Схема взаємодії частинок порошкової суміші з факелом

Динаміка руху твердих частинок в струмені газу визначається швидкістю і властивостями газу, а також швидкістю, розмірами, вагою і формою частинок. Для визначення основних факторів, що керують рухом частинок в зоні плавлення необхідно знати взаємодію частинок з струменем її парів основного металу.

З метою отримання рівняння руху частинок в газовому факелі потрібно врахувати допущення, що дозволяють спростити рішення задачі [26]:

а) частинки порошкової суміші мають однаковий діаметр і не взаємодіють між собою;

б) при русі частинок тиск на них створюється тільки парами основного металу.

Взаємодія потоків парів на сферичну частинку представляє собою силу лобового опору  $F_{(x)}$ , що направлений по потоку:

$$F_{(x)} = \frac{C_x \cdot \omega_r \cdot \rho_1 (v_1 - v_r)^2}{2}, \quad (3.7)$$

де  $C_x$  - безрозмірний коефіцієнт лобового опору;

$\omega_r$  - площа поперечного перерізу частинки, м<sup>2</sup>;

$(v_1 - v_r)$  - відносна швидкість руху газу навколо частинок, що має швидкість  $v_r$ , м/с;

$\rho_1$  - щільність парів, кг/м<sup>3</sup>.

Рівняння руху частинок порошкової суміші в лазерному факелі мають вид [25]:

$$X(r) = X_0 + X_0 r - \sin \delta \cdot \frac{m}{\gamma} \cdot \ln \left( \frac{m}{\gamma} \cdot k_0 \cdot r + 1 \right) + \sin \delta \cdot k_0 \cdot r, \quad (3.8)$$

$$Z(r) = Z_0 + Z_0 r - \cos \delta \cdot \frac{m}{\gamma} \cdot \ln \left( \frac{m}{\gamma} \cdot k_0 \cdot r + 1 \right) + \cos \delta \cdot k_0 \cdot r, \quad (3.9)$$

де  $X_0, Z_0$  - координати точки входження частинки в лазерний факел;

$r$  - час взаємодії частинки з лазерним факелом, с.

Координати точки входження частинки в лазерний факел визначаються по теорії синусів, згідно якої (рис. 3.2) можна записати [25]:

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= H \cdot \frac{\sin \delta \cdot \sin \alpha_0}{\sin(\alpha_0 + \delta)} \\ Z_0 &= H \cdot \frac{\sin \delta \cdot \cos \alpha_0}{\sin(\alpha_0 + \delta)} \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

де  $H$  – рівень, на якому знаходиться поверхня ванни, мм;

$\alpha_0$  - кут між вертикаллю і початковим напрямом руху частинок;

$\delta$  - кут між вертикаллю і напрямом джерела лазерного факелу.

### 3.3. Розрахунок технологічних параметрів лазерного наплавлення

Одним з основних параметрів лазерного наплавлення, що визначає якість технологічного процесу, є величина необхідної щільності потужності випромінювання  $q_n$  [23]:

$$q_n = 2\pi\lambda T_m Z_{\max}, \quad (3.11)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності основного металу, Вт/К·м;

$T_m$  - температура плавлення металу, К;

$Z_{\max}$  - максимальна глибина проплавлення, м.

Оскільки щільність потужності залежить від співвідношення потужності лазерної установки  $P$  і діаметру  $d$  лазерного струменю на фокусуючій оптиці, то можна записати [18]:

$$q_n = \frac{4P \cdot K_n}{\pi d^2}, \quad (3.12)$$

де  $K_n$  - коефіцієнт, що характеризує процес лазерного наплавлення, який визначається через продуктивність процесу  $G_n$ :

$$K_n = \frac{G_n}{P}, \quad (3.13)$$

де  $P$  – робоча потужність випромінювання, Вт.

З врахуванням швидкості лазерного впливу, отримаємо технологічний показник процесу лазерного наплавлення – питому енергію наплавлення  $E_n$ :

$$E_n = \frac{PK_n}{v_n d}. \quad (3.14)$$

Висота наплавленого валику, з врахуванням введеної кількості тепла, визначається із виразу:

$$h_n = \frac{P_0 \cdot \eta_{ef}}{v \cdot \rho \cdot m_{nl} \cdot B}, \quad (3.15)$$

де  $P_0$  - ефективна потужність лазерного променя;

$\eta_{ef}$  - термічний коефіцієнт корисної дії;

$\rho$  - щільність основного металу, Дж/кг;

$B$  – ширина наплавленого валику, м.

В свою чергу, термічний коефіцієнт корисної дії представляє собою відношення теплоти, що необхідна для проплавлення, до всієї теплоти, що введена в деталь, і визначається по формулі:

$$\eta_{ef} = \frac{v \cdot F_{np} \cdot S_{nl}}{P_0}, \quad (3.15)$$

де  $v$  - швидкість лазерного наплавлення, м/с;

$F_{np}$  - площа поперечного перерізу проплавленої зони, м<sup>2</sup>;

$S_{nl}$  - питомий об'ємний тепловміст розплавленого металу, враховуючи приховану теплоту плавлення, Дж/м<sup>3</sup>.

### 3.4. Дослідження режимів нанесення покриттів

Проведення лабораторних експериментальних досліджень при дії лазерним променем дозволяє виявити умови проведення наплавлення і оптимальну технологію лазерної обробки відновлювальної поверхні деталі.

Зміна температурного поля лазерного випромінювання по глибині для сталевих зразків показано на рис.3.3.

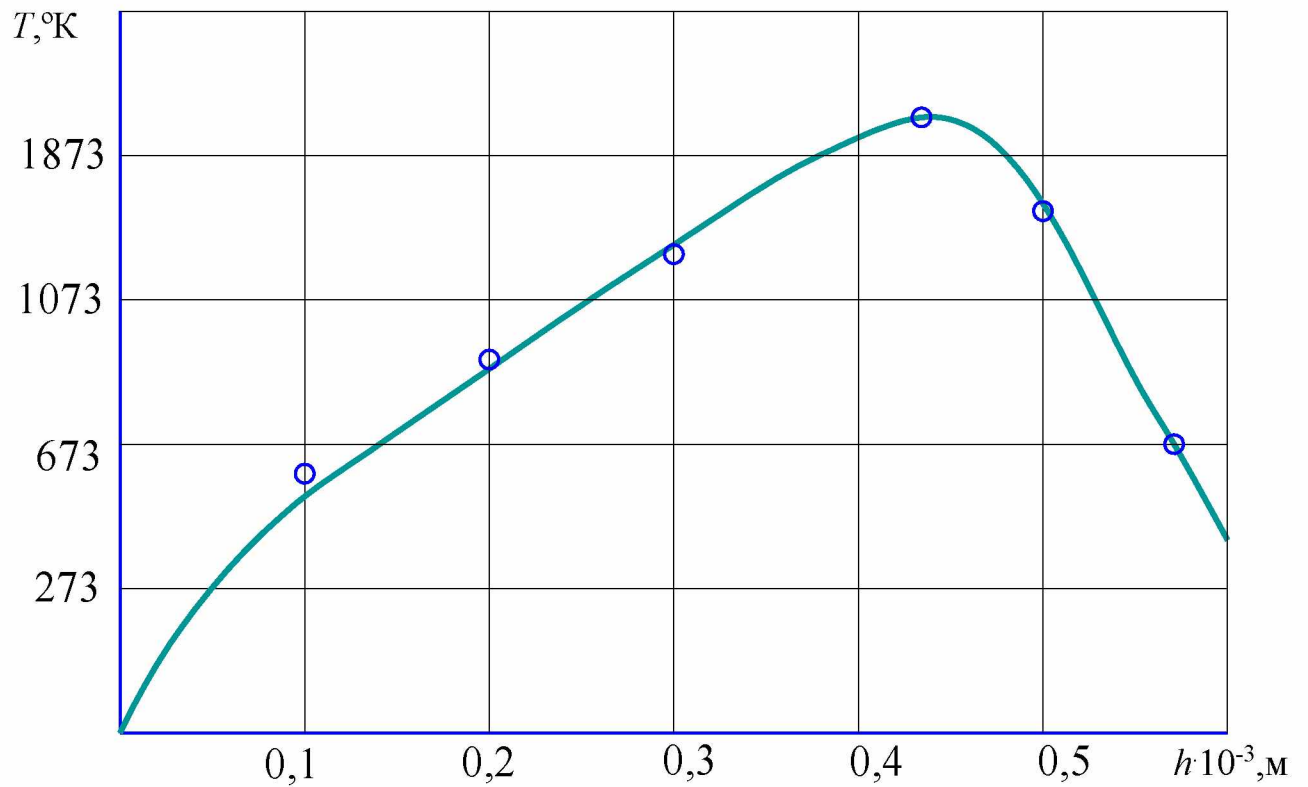
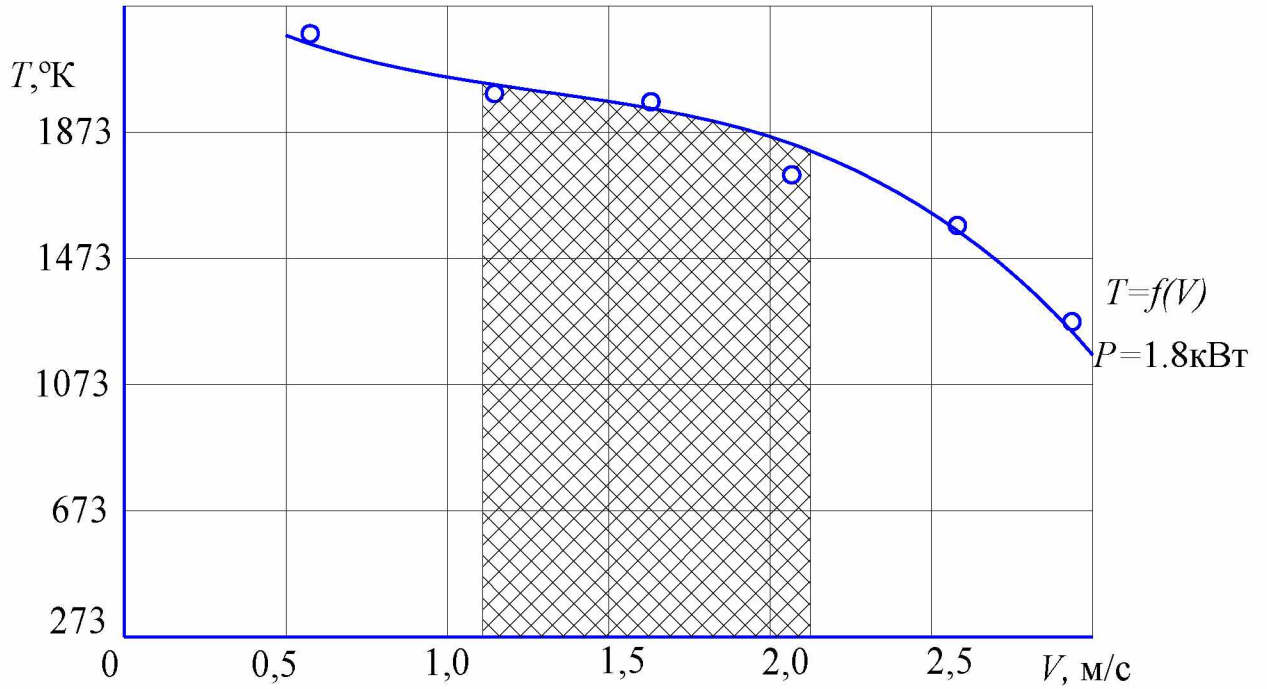
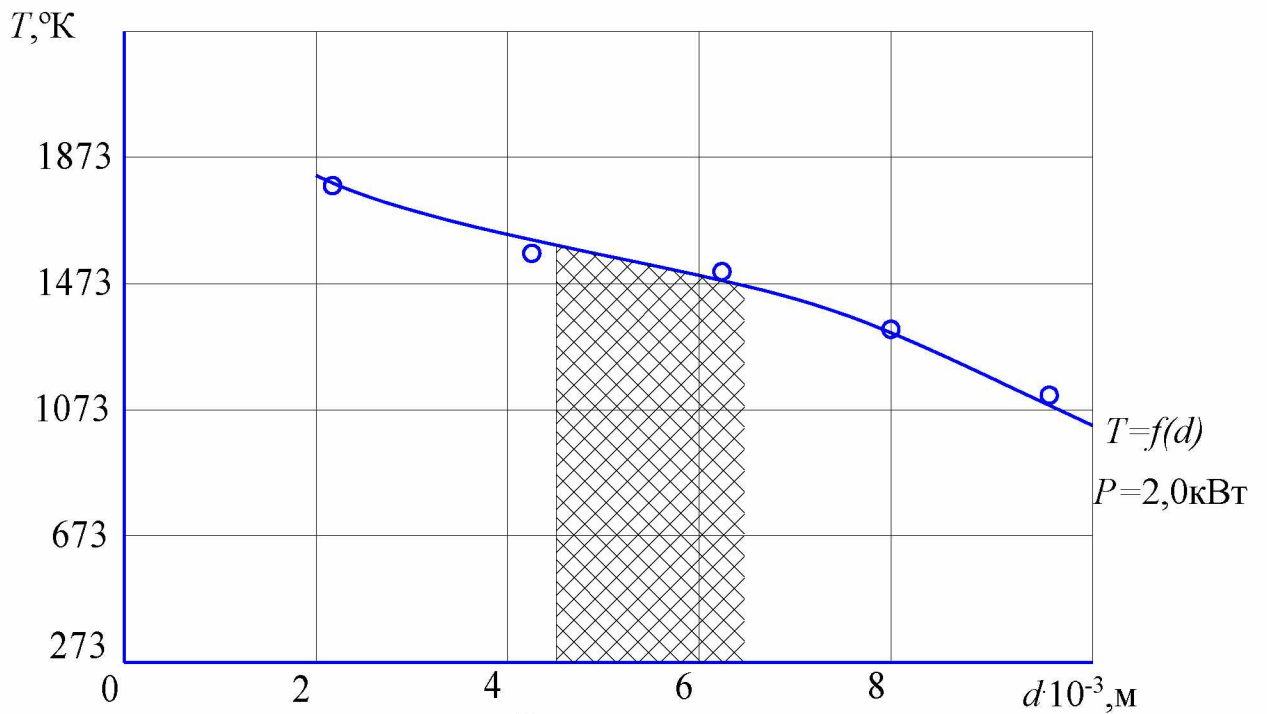


Рисунок 3.3 – Розподіл температурного поля лазерного наплавлення по глибині сталюго зразка ( $P = 1,8$  кВт;  $v = 2,5$  м/с;  $t = 0,05 \dots 2,0$  с)

Залежності нагрівання поверхонь від швидкості обробки і діаметру лазерного променя представлена на рис. 3.4.



a)



б)


 - зона оптимальних режимів лазерного наплавлення

Рис. 3.4 – Залежність нагрівання поверхонь сталевих зразків від швидкості переміщення  $v$  (а) і діаметру випромінювання  $d$  (б)

Аналіз залежності (рис. 3.4) показує про наявність області оптимальних режимів обробки, при яких відбувається технологічний процес оплавлення покриття.

При теоретичних розрахунках в рівняннях підставляли чисельні значення величин, приведених в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри, що характеризують залежності  $X$  і  $Z$

$\rho_1,$ кг/м <sup>2</sup>	$d_u,$ м	$v_u,$ м/с	$v_1,$ м/с	$C_x$	$\alpha_0,$ град	$\delta,$ град	$H,$ м
1,783	$10^{-4}$	2,7	45	0,6	45	10	0

Результати теоретичного і експериментального визначення кута вильоту частинок порошкової суміші представлений на рис. 3.5

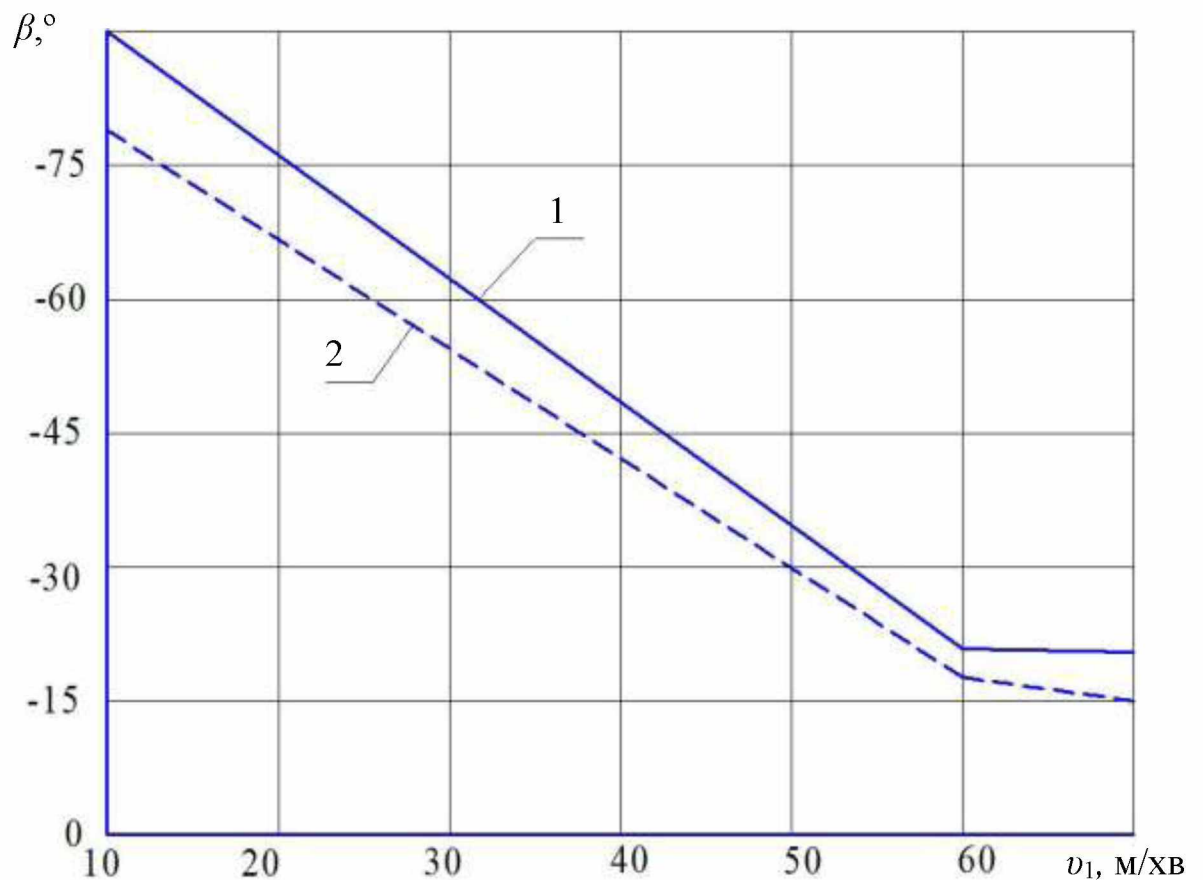


Рис. 3.5 – Залежність кута вильоту частинок із факелу від їх початкової швидкості: 1 – експериментальна крива; 2 – розрахункова крива

Розходження між теоретичними і експериментальними значеннями склало не більше 10% і є результатом помилок, що пов'язані зі зміною перерізу факелу, неврахуванням розподілу швидкості парів в газопорошковому потоці присадочного порошку.

### 3.5. Дослідження складу і структури покриттів

Вивчення структури шліфів показало, що вона не має пор, тріщин і раковин, що вказує на хорошу якість покриття. Травленням шліфів була виявлена структура (рис. 3.6).

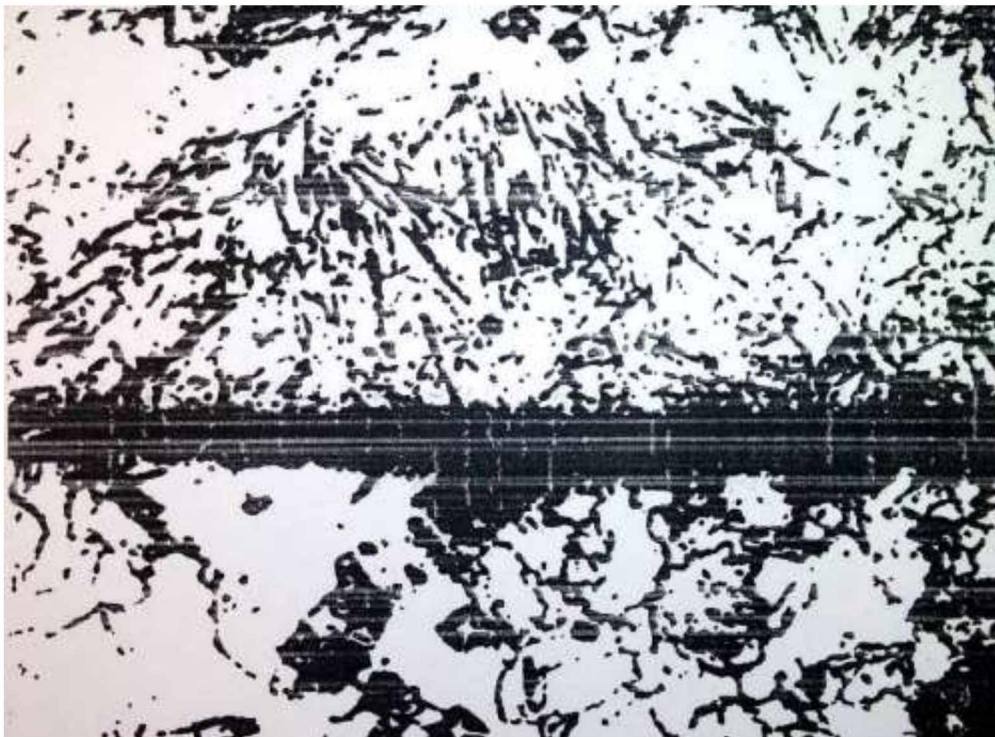


Рисунок 3.6 – Мікроструктура наплавленого на сталь 45 покриття із порошку ПГ-Н70Х17С4Р4 (зб.250;  $P = 1250\text{Вт}$ ;  $d = 5\text{мм}$ ;  $v = 0,94\text{м/с}$ )

Частина темних включень по межі з матрицею, напевно, представляє собою нерозчинені структурні складові, що входять в склад вихідного порошку.

Твердість наплавленого шарів залежить від швидкості наплавлення (рис. 3.7).

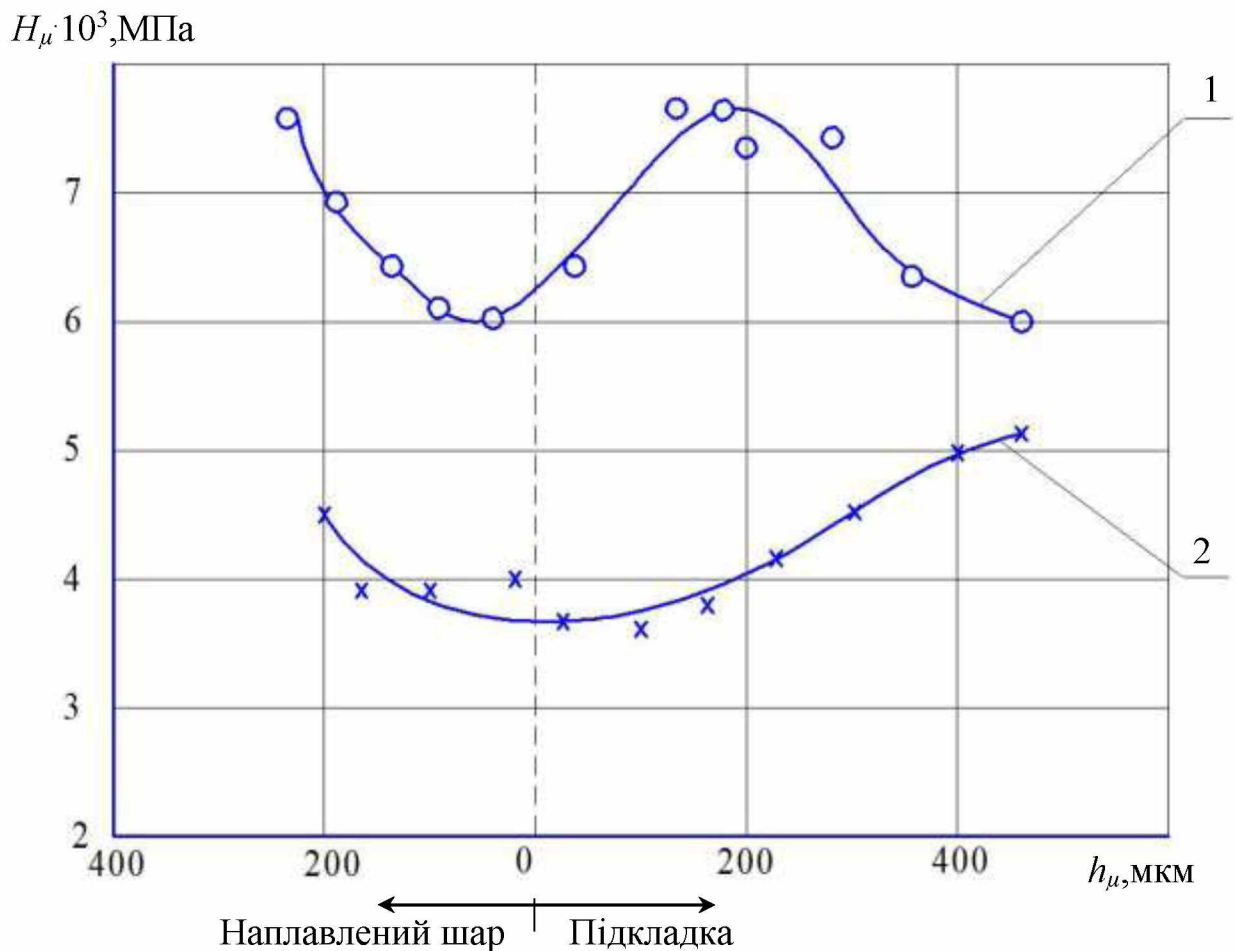


Рисунок 3.7 – Розподіл твердості по глибині наплавленого шару при наплавленні порошку ПГ-Н70Х17С4П4 на сталь 45:  $P = 1300 \text{Вт}$ ;  $d = 5 \text{мм}$ ;  $v = 1,3 \text{м/с}$ (1);  $v = 0,9 \text{м/с}$ (2)

Максимальна твердість 7500 МПа була отримана при швидкостях наплавлення  $v = 0,9 \text{ м/хв}$ , а мінімальна 3500 МПа при швидкості наплавлення  $v = 1,3 \text{ м/хв}$ .

Дослідження показали незалежність структури і твердості шарів від форми частинок порошку. Фракційний склад порошку значного впливу на твердість наплавленого шару не має. Спостерігається тенденція зростання твердості формуючого шару зі збільшенням швидкості наплавлення.

Дослідження покриттів наплавлених порошковими сумішами показало, що твердість наплавленого шару суттєво залежить від параметрів наплавлення, в тому числі від швидкості наплавлення, діаметру випромінювання, зернистості порошкового матеріалу.

По даним [27] введення порошкового алюмінію в порошкові суміші знижує наявність в наплавленому металі пор.

Залежність кількості пор на одиницю площі наплавленого шару показана на рис. 3.8.

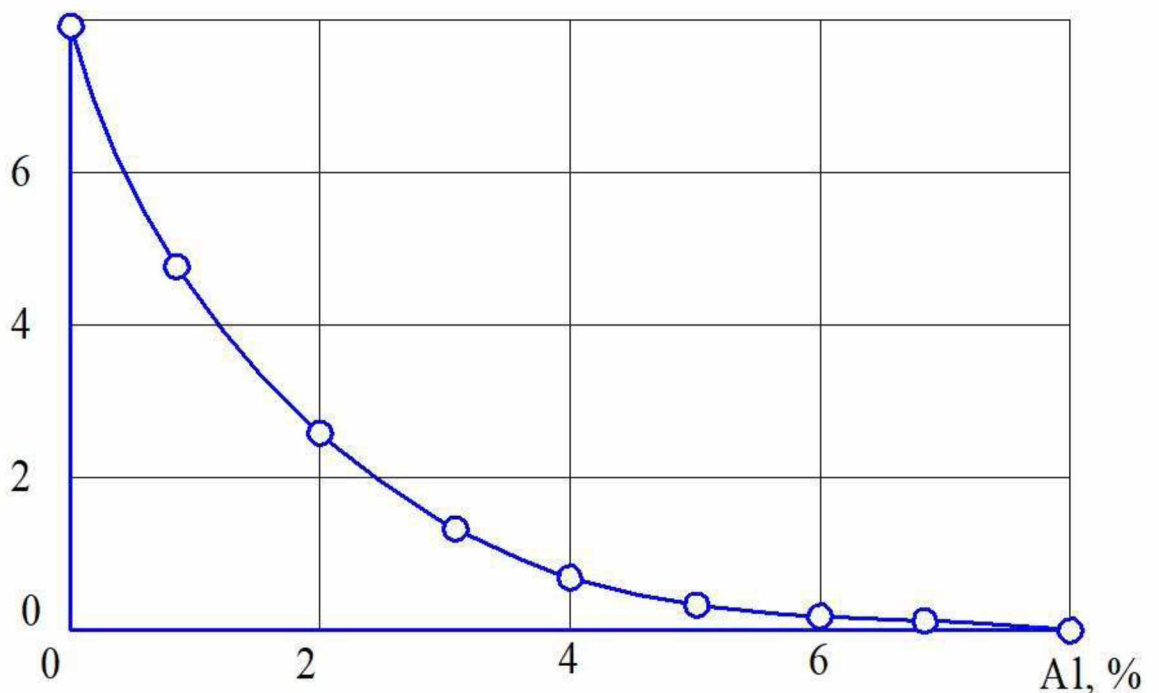


Рисунок 3.8 – Залежність утворення числа пор в наплавленому шарі від вмісту алюмінію в наплавленому порошку (наплавлення порошковою сумішшю ПГ-ФБХ6-2+ПГ-Н70Х17С4Р2+порошковий алюміній)

Найбільше оптимальне співвідношення вмісту алюмінію в складі порошкової суміші для лазерного наплавлення досягає 4...6%.

### 3.6. Дослідження властивостей покриттів і оптимізація режимів лазерного наплавлення

Дані міцності зчеплення покриттів нанесених лазерним наплавленням з металом підкладки порошковою сумішшю ПГ-Н70Х17С4Р4, визначені методом відриву штифтів, приведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Експериментальні дані міцності

№ штифта	Зусилля відриву штифта, Н	Міцність покриття з основою, МПа	Середнє значення	
			P, Н	$\sigma$ , МПа
1	5200	249	4700	251
2	5020	244	4700	251
3	5380	259	4700	251

Проведені дослідження зносостійкості «диск-колодочка» дозволяють оцінити працездатність таких пар. Імітація спряження, що здійснювалася на машині тертя, дозволила отримати результати для конкретної пари деталей із заданими умовами експлуатації (вид тертя, форма поверхні, змазка, навантаження).

Твердість шарів наплавлення значно залежить від режимів наплавлення. Знос зразків при лазерному наплавленні отримали для ПГ-Н70Х17С4Р4 в 2,7 рази нижче, ніж знос зразків загартованих СВЧ. Підвищення зносостійкості наплавлених поверхонь можна пояснити більш високою твердістю, формуванням текстури покриттів.

Випробування зразків на контактну міцність, проведені при навантаженнях 1000...2000 Н, формували в поверхневих шарах досліджуваної пари напруги 850...1240 МПа. Результати досліджень показали, що контактна міцність покриття ПГ-Н70Х17С4Р4 в значному діапазоні навантажень не нижче контактної міцності поверхонь зразків із термообробленої сталі 45 (рис. 3.9).

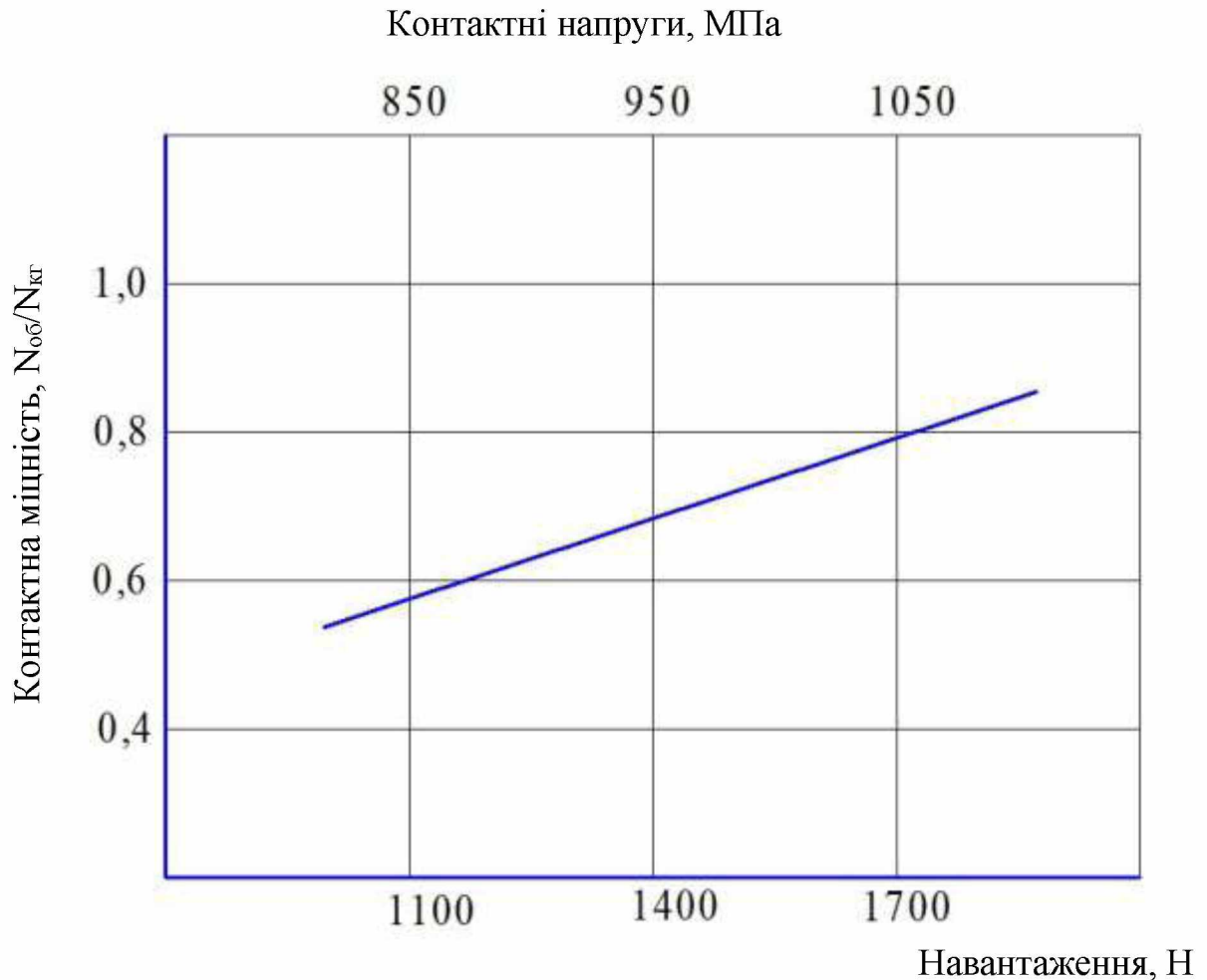


Рис. 3.9 – Результати досліджень на контактну міцність

В основу вибору і оптимізації технологічних режимів лазерного наплавлення покладені умови якості технологічного процесу отримання шарів наплавленого металу високої твердості.

Дослідження проводилися при наступних технологічних параметрах: товщина шару покриття 0,05...2,0 мм; діаметр лазерного променя 3,5...7,0 мм; швидкість переміщення лазерного променя 0,5...2,2 м/хв.

Встановлена залежність оптимальних технологічних параметрів лазерного наплавлення для сталі 45 в залежності від швидкості наплавлення ( $v_{\text{опт}} = 0,5 \dots 1,7$  м/хв) і діаметру лазерного променя ( $d_{\text{опт}} = 0,4 \dots 2,2$  мм).

## **Висновки**

1. Запропонована тепло-фізична модель взаємодії лазерного випромінювання з наплавленими порошковими матеріалами і матеріалом основи відновлювальної деталі.

2. Отримані рівняння для технологічних параметрів лазерного наплавлення: щільності потужності випромінювання, питомої енергії наплавлення, висоти наплавленого шару.

3. Розбіжність між теоретичними і експериментальними значеннями склали не більше 10%.

4. Твердість наплавленого шару залежить від параметрів наплавлення: швидкості наплавлення, діаметру випромінювання, зернистості порошкового матеріалу.

5. Оптимальними технологічними параметрами є: швидкість наплавлення 0,5...1,7 м/хв; діаметр лазерного променя 0,4...2,2мм.

## РОЗДІЛ 4

### РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБОК

#### 4.1. Екологічна експертиза розробок

Екологічна експертиза являє собою врегульовану нормами діяльність експертів по аналізу, перевірці і оцінці документації об'єктів і рішень, на їх відповідність правилам і вимогам охорони навколишнього середовища і раціонального природовикористання в цілях попередження можливих негативних наслідків для навколишнього середовища.

Цілі екологічної експертизи: забезпечення наукового визначення відповідності проектних рішень сучасним екологічним вимогам перед їх затвердженням в компетентних державних органах; попередження можливого негативного втручання на екосистему функціонуючих і проектуємих об'єктів в процесі її реалізації.

Екологічна експертиза буває державною, громадською, а також інших видів. Вона є обов'язковою умовою законодавчої роботи господарства і іншої діяльності, яка впливає на стан навколишнього середовища. В останні роки відбуваються негативні зміни навколишнього середовища, тому у 1991 році 25 червні на третій сесії Верховної Ради України був прийнятий Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», в 1995 р. - Закон України «Про екологічну експертизу». Які визначають правові, екологічні і соціальні основи організації охорони навколишнього середовища, екологічної експертизи.

Екологічну експертизу проекту проводять з дотриманням принципів права громадськості на охорону навколишнього середовища, гармонійного поєднання екологічних і економічних інтересів, суворого дотримання законності і державних норм природокористування [4].

Громадська екологічна експертиза може здійснюватися в будь-якій сфері діяльності, що потребує екологічного обґрунтування, за ініціативою громадських організацій чи інших громадських формувань. Громадська екологічна експертиза може здійснюватися одночасно з державною екологічною експертизою шляхом створення на добровільних засадах тимчасових або постійних еколого-експертних колективів громадських організацій чи інших громадських формувань.

Еколого-експертний процес складається з трьох основних етапів підготовчого, або перевірки необхідних даних, представлених проектних матеріалів і їх відповідності до законодавства: основного, або аналітичної обробки даних по об'єктах експертизи; заключного, або підведення результату і оцінці даних і складання акту експертизи.

Введення в експлуатацію споруд і об'єктів, пов'язаних з технічним обслуговуванням і ремонтом, дозволяється при наявності необхідних очисних споруд, погоджених з місцевими органами Держсаннагляду. Стічні води можна відводити у водостічну каналізацію після очищення їх в брудовідстійниках і нафтовловлювачах.

Всі нафтопродукти, що зливаються із машин у вигляді відстою палива, відпрацьованого масла, використаних на технологічні потреби бензину, гасу, розчинів, обов'язково збирають для здачі на бази нафтопостачальних організацій, утилізації та знищення методами, що погоджуються з Держсаннаглядом. Основним пунктом збирання і зберігання відпрацьованих нафтопродуктів у господарстві є спеціально виділене робоче місце на центральному нафтосховищі. Для кожної групи відпрацьованих нафтопродуктів встановлена місткість 3...5 м на одному фундаменті.

Категорично забороняється зливати й випускати відстій, паливо, відпрацьовані масла, мастила та спеціальні рідини на землю.

На ремонтній майстерні джерелами можливого викиду забруднюючих речовин в атмосферу є обладнання встановлене на ділянках: мідницько-

жерстяницькому, зварювальному, ковальському, обкатування і випробування двигунів, діагностування машин.

При проведенні робіт в мідницько-жерстяницькому відділенні в атмосферу викидаються пари сірчаної та соляної кислот, свинцю, цинку, а також газу, що утворились при спалюванні бензину при роботі паяльних ламп.

Під час проведення зварювальних робіт в атмосферу потрапляють токсичні газу ( $\text{CO}$  і  $\text{NO}$ ) і дрібнодисперсний пил (розмір часток до 3 мкм).

Вентиляційне повітря, що викидається з приміщення ковальської ділянки містить пил, чадний газ, сірководень, сажу, з'єднання азоту.

При виконанні шліфувальних, обдирних, та заточувальних робіт утворюється абразивний пил, який складається на 30...40% з матеріалу абразивного круга, а також на 60...70% з матеріалу виробу, що обробляється [4].

В складі відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згорання міститься  $\text{NO}$  і  $\text{CO}$ , сажу, альдегіди, сірчаний ангідрид та інші токсичні і концентровані речовини.

Згідно із системою безпеки стандартів праці та загальними санітарно-гігієнічними вимогами вміст шкідливих речовин в майстерні не повинен перевищувати наступних значень: сірчаний ангідрид -  $10 \text{ мг/м}^3$ , оксид вуглецю -  $20 \text{ мг/м}^3$ , двоокис азоту -  $5 \text{ мг/м}^3$ , тверді речовини -  $1 \text{ мг/м}^3$ .

В зв'язку з цим для забезпечення чистоти повітря, крім пристрою вентиляції, пропонуємо встановлення пристрою для очищення повітря від забруднюючих речовин.

Для відсмоктування пилу з робочої зони обдирно-шліфувального верстата, використовуємо загальну систему вентиляції з циліндричним циклоном ЦН-15, для відсмоктування пилу при виході повітря в атмосферу. Такий циклон добре очищує повітря від пилу, а шкідливі домішки і сажу в повітрі ділянки не містяться.

На зварювальній ділянці проектуємо місцеву вентиляцію з очищенням повітря у сопловому вихровому пиловловлювачі. Він добре очищує повітря від дрібнодисперсних частинок, розміром менше 3 мкм.

У приміщенні ковальського цеху, на ділянках обкатування і випробування двигунів, технічного обслуговування та діагностики машин також встановлюємо місцеву вентиляцію з примусовим повітрообміном. В системі відведення відпрацьованих газів ділянки обкатки та випробування двигунів, а також ділянки технічного обслуговування та діагностики, пропонуємо встановити нейтралізатор відпрацьованих газів НВГ.

Ремонт і зарядження акумуляторів характеризується підвищеною шкідливістю, так як пил свинцю і його сполуки високотоксичні. Кислотні пари, при перевищенні їх ГДК=0,01 мг/м<sup>3</sup> здійснюють загальний токсичний вплив на організм людини. Тому цю ділянку забезпечуємо місцевим вентиляванням з очищенням вентиляційного повітря.

На ділянці поточного ремонту і регулювання паливної апаратури, встановлюємо фільтровентиляційну установку з фільтром.

Відпрацьовані технічні рідини та масла, відстої дизельного палива зливають окремо в спеціальні герметичні ємності, в яких вони відстоюються на протязі двох місяців. Потім зливаються в автоцистерну і транспортуються на пункт збирання відпрацьованих мастил і технічних рідин нафтобази.

Стічні води з ділянки зарядки та зберігання акумуляторів містять сірчану кислоту, луги і солі свинцю, тому вони повинні підлягати взаємній нейтралізації, шляхом змішування їх у фільтру-відстійнику, а потім пропускатися через розчин вапна, де повністю нейтралізуються і направляються в живильний басейн для можливого їх повторного використання на цій ділянці.

Всі заходи по забезпеченню екологічної безпеки виробничої діяльності повинні проводитись комплексно, з врахуванням всіх, вище наведених вимог щодо виробничого процесу для забезпечення його екологічної безпеки, навіть якщо це пов'язано із значними матеріальними затратами і низькою їх

окупністю, так як мова йде про збереження навколишнього середовища та здоров'я людей.

## **4.2. Охорона праці**

Охорона праці включає техніку безпеки, що запобігає травматизму, і виробничій санітарії, перешкоджає виникненню захворювань із-за дії шкідливих чинників. Впровадження раціонального комплексу заходів, направлених на поліпшення умов праці, може забезпечити приріст її продуктивності на 15...20%. Структура комплексу заходів наступна.

1. Аналіз стану охорони праці або безпеки технологічного процесу на підприємстві.

2. Розробка організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних заходів щодо поліпшення стану охорони праці.

3. Розробка вимог (інструкцій) з охорони праці при роботі на технологічному (модернізованому) обладнанні або при використанні запропонованого пристосування.

4. Аналіз і оцінка пожежної безпеки підприємства, організація пожежної профілактики (визначення категорії виробництва по пожежній небезпеці, ступені вогнестійкості будівельних конструкцій, обґрунтування первинних засобів і витрати води для гасіння пожежі).

Аналіз стану охорони праці. Його проводять так, щоб можна було визначити передумови для розробки заходів щодо зниження травматизму і поліпшення умов праці.

При аналізі стану охорони праці при організації і технології ремонтно-обслуговуючих робіт враховують наступне:

- дотримання законодавства про режим праці і відпочинку працюючих;

- відповідність організації забезпечення охорони праці вимогам нормативних документів;

- планування заходів щодо охорони праці, виділення і використання грошових і матеріальних коштів на їх виконання;
- відповідність будівлі ремонтно-обслуговуючого підприємства (приміщення виробничої ділянки) вимогам санітарних і будівельних норм і правил;
- можливість появи шкідливих і небезпечних виробничих чинників, основні причини виробничих травм;
- дотримання вимог безпеки при використанні обладнання, вантажопідійомних машин і судин, що працюють під тиском;
- динаміку травматизму і захворюваності;
- санітарно-побутові умови працівників;
- пожежну безпеку (характеристика технологічних процесів по пожежній небезпеці, наявність і готовність первинних і технічних засобів пожежогасіння, дотримання вимог пожежної безпеки, наявність і стан грозозахисних пристроїв і т. п.).

Заходи щодо поліпшення стану охорони праці або безпеки технологічних процесів розробляють на основі аналізу. Вони повинні бути конкретними.

Заходами передбачають:

- поліпшення діяльності адміністрації (наймача) з дотримання трудового законодавства і виконання вимог нормативної документації з охорони праці;
- вдосконалення системи навчання працівників охорони праці відповідно до нормативних документів;
- поліпшення контролю і нагляду за дотриманням вимог охорони праці;
- застосування засобів наочної агітації з безпеки праці, поліпшення планування з охорони праці;
- заміну небезпечних технологічних процесів безпечними;
- розробку пристроїв, що забезпечують безпечну експлуатацію технологічного обладнання і систем, забезпечення електробезпеки;

- створення нормального повітряного середовища за рахунок вентиляції і опалювання;
- забезпечення гігієнічних вимог до природного і штучного освітлення;
- зниження рівнів шуму і вібрацій на робочих місцях;
- забезпечення пожежної безпеки;
- створення необхідних санітарно-побутових умов для працівників підприємства.

### **4.3. Техніко-економічне обґрунтування ефективності відновлення деталей лазерним наплавленням**

Техніко-економічні показники запропонованого відновлення деталей сільськогосподарської техніки лазерним наплавленням дають можливість оцінити доцільність і ефективність проведення організаційно-технічних заходів при впровадженні даного способу в виробництво на ПАТ «Спецлісмаш» (м. Лубни, Полтавська область).

Техніко-економічна оцінка ефективності методу відновлення деталей лазерним наплавленням виконана у відповідності до рекомендацій [28].

Річний економічний ефект від впровадження розробленої технології лазерного наплавлення при відновленні розподільчого валу трактора МТЗ-82.1 визначали за формулою:

$$E = [(c_1 + E_n k_1) - (c_2 + E_n k_2)] B_T, \quad (4.6)$$

де  $c_1$  і  $c_2$  – собівартість нового та відновленого методом лазерного наплавлення розподільчого валу;

$E_n = 0,15$  – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень [29];

$k_1 = k_2 = 315$  - питомі капітальні вклади на придбання технологічного

обладнання, грн;

$B_T$  – річна програма відновлення за розробленою технологією, шт.

Затрати  $C_y$  на придбання установки по даним ПАТ «Спецлісмаш» склали 253000 грн. Дані про вартість обладнання і трудомісткості відновлення деталей приведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вартість обладнання і трудомісткості відновлення

Складові (показники)	Розподільчий вал двигуна трактора МТЗ-82.1 (240-1006015А)
1. Найменування операції	Наплавлювальна (лазерне наплавлення)
2. Марка обладнання	Лазерний технологічний комплекс ЛА-25Н1М
3. Вартість обладнання, грн	1071000
4. Трудомісткість, год	0,80
5. Вартість нового розподільчого валу, грн	1255

Розрахунок собівартості відновлення розподільчого валу виконували по елементам затрат по наступній формулі:

$$C = C_{з.п.} + C_m + C_e + C_a + C_m + C_{об} + C_{н.р.}, \quad (4.22)$$

де  $C_{з.п.}$  – заробітна плата виробничих робітників, зайнятих на операціях, що пов'язані із лазерною обробкою, грн.;

$C_m$  – витрати на використанні при відновленні матеріали, грн.;

$C_e$  – затрати на електроенергію, грн.;

$C_a$  – затрати на амортизацію обладнання, грн.;

$C_{об}$  – затрати на утримання і ремонт обладнання і оснастки, грн.;

$C_{н.р.}$  – накладні витрати, грн.

Собівартість одного нового розподільчого валу на вересень 2017 року склала  $C_1 = 1255$  грн., а відновленої  $C_2 = 251$  грн.

Очікуваний економічний ефект від впровадження розробленої технології складе:

$$E = [(1255 + 0,15 \cdot 315) - (251 + 0,15 \cdot 315)] \cdot 2000 = 2008000 \text{ грн.},$$

Економічний ефект на одиницю продукції становить 1004 грн.

Основні показники техніко-економічної ефективності відновлення розподільчих валів наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Показники техніко-економічної ефективності

Показники економічної ефективності	Значення показників	
	Існуюча технологія виготовлення	Розроблена технологія відновлення
1. Річний обсяг виготовлення і відновлення лап, грн.	2000	2000
2. Собівартість одного розподільчого валу, грн.	1255	251
3. Питомі капітальні вкладення, грн.	315	
5. Річний економічний ефект, грн.		2008000
6. Економічний ефект на одиницю продукції, грн.		1004

### Висновки

1. Вартість одного розподільчого валу, відновленого методом лазерного наплавлення, в 5 раз нижча ніж вартість нового.

2. Економічний ефект від впровадження розробленої технології склав 2008000 грн. при річному обсязі відновлення 2000 шт.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблена методика проведення досліджень структури і властивостей покрить лазерного наплавлення.
2. Приводиться методика проведення зносостійких досліджень і досліджень на контактну міцність.
3. Отримані рівняння для технологічних параметрів лазерного наплавлення: щільності потужності випромінювання, питомої енергії наплавлення, висоти наплавленого шару.
4. Розбіжність між теоретичними і експериментальними значеннями склали не більше 10%.
5. Твердість наплавленого шару залежить від параметрів наплавлення: швидкості наплавлення, діаметру випромінювання, зернистості порошкового матеріалу.
6. Оптимальними технологічними параметрами є: швидкість наплавлення 0,5... 1,7 м/хв.; діаметр лазерного променя 0,4... 2,2мм.
7. Вартість одного розподільчого валу, відновленого методом лазерного наплавлення, в 5 раз нижча ніж вартість нового.
8. Економічний ефект від впровадження розробленої технології склав 2008000 грн. при річному обсязі відновлення 2000 шт.