

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**ХОДАКІВСЬКИЙ ІЛЛЯ ВІКТОРОВИЧ**

УДК 621.43

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Застосування технології відновлення деталей машин лазерним  
наплавленням порошковими сумішами**

(тема роботи)

**208 «Агроінженерія»**

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр  
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Ходаківський І. В.  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи  
Сукманюк Олена Миколаївна  
(прізвище, ім'я, по батькові)  
к.і.н., доцент  
(науковий ступінь, вчене звання)

## АНОТАЦІЯ

Ходаківський І.В. Застосування технології відновлення деталей машин лазерним наплавленням порошковими сумішами. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2022.

Робота присвячена проблемі удосконалення технології відновлення деталей сільськогосподарських машин лазерним наплавленням. Проведені дослідження були направлені на створення ефективної технології лазерного наплавлення відповідальних деталей сільськогосподарської техніки з використанням порошкових сумішей, так як при використанні даного способу покращаються експлуатаційні характеристики робочих поверхонь деталей машин.

**Ключові слова:** відновлення, лазерне наплавлення, деталі сільськогосподарських машин, порошкові суміші.

## ABSTRACT

Khodakivskiy I. Application of technology for the restoration of machine parts by laser cladding with powder mixtures. . Qualifying work for a master's degree in specialty 208 - Agroengineering. - Polissia National University, Zhytomyr, 2022.

The work is devoted to the problem of improving the technology of restoration of parts of agricultural machines by laser surfacing. The conducted research was aimed at creating an effective technology of laser surfacing of important parts of agricultural machinery using powder mixtures, as the use of this method will improve the performance characteristics of the working surfaces of machine parts.

**Key words:** restoration, laser surfacing, parts of agricultural machines, powder mixtures.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ОБРОБІТКУ	6
1.1. Аналіз застосування методів наплавлення для відновлення деталей сільськогосподарської техніки	6
1.2. Зміцнення деталей лазерним променем. Устаткування і оснащення для лазерної обробки	8
1.3 Лазерне наплавлення. Матеріали для лазерного наплавлення	11
1.4 Застосування лазерного наплавлення для зміцнення і відновлення деталей машин	15
Висновки по розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЛАЗЕРНИМ НАПЛАВЛЕННЯМ	18
2.1. Теоретичні основи зміцнення робочих поверхонь, відновлюваних лазерним розплавленням шлікерних обмазок	18
2.2. Теоретичні аспекти процесу використання порошкових сумішей для лазерного наплавлення	19
2.3. Вибір і розрахунок технологічних параметрів лазерної наплавки	21
Висновки по розділу 2	22
РОЗДІЛ 3. ОБГРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЦЕС НАПЛАВКИ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ	23
3.1. Лазерне устаткування для проведення наплавлення	23
3.2. Оптимізація режимів нанесення лазерного покриття	24
3.2.1. Оцінка температурних полів при лазерній обробці	24
3.2.2. Результати аналізу процесу подачі частинок ПС в зону лазерного наплавлення	27
3.3. Характеристика основних властивостей покриттів	28
3.4. Вибір і обґрунтування номенклатури деталей сільськогосподарських машин для лазерного відновлення	32
3.5. Дефекти розподільчого валу і способи їх усунення	33
3.6. Технологічний процес лазерного наплавлення відновлюваних деталей	37
Висновки по розділу 3	39
ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	41

## ВСТУП

Оснащення сільськогосподарського виробництва України сучасною продуктивною технікою вимагає подальшого вдосконалення технічного обслуговування і ремонту машин. Це зв'язано з тим, що використання нових технологій, матеріалів дозволяє підвищити надійність сільськогосподарських машин і агрегатів, але не усуває спрацювання деталей і з'єднань в період їх експлуатації. Це приводить, у свою чергу, до зниження техніко-економічних показників використання машинотракторного парку в АПК.

В господарствах після капітального ремонту експлуатується більше 50% тракторів, 60% комбайнів, 75% двигунів, що викликає (при низькому моторесурсі) високу потребу в ремонтно-обслуговуючому виробництві. В даний час в господарствах використовується велика кількість запасних частин, які значно підвищують вартість ремонтних робіт. Відновлення зношених деталей дозволяє понизити витрати на ремонт техніки. Практика показує, що ресурс відновлених деталей досягає ресурсу нових, при вартість на 40-50% нижче нових.

Важливе місце при цьому належить розробці і застосуванню прогресивних технологій, що дозволяють різко поліпшити якісні показники відновлюваних деталей.

В сучасному ремонтному виробництві значна роль належить наплавленню, як провідному способу відновлення зношених деталей. Питома вага зварювально-наплавлювальних процесів, в загальному об'ємі відновлення деталей, складає 75-80%. Питанням розробки і застосування таких процесів в практиці ремонтного виробництва, присвячені роботи великої групи учених, у тому числі, Є.Л. Воловика, В.А. Дієва, Н.П. Дорожкіна, В.А. Коржа, Н.В. Молодика, А.В. Поляченко, А.І. Сідашенко, М.І. Черновола, В.И. Черноіванова і ін. Проте разом з широким використанням традиційних методів наплавлення, є питання технологічного плану, що обмежують їх застосування для відновлення деталей складної форми, невеликого місцевого спрацювання, що порушує нормальну роботу складних і точних вузлів і агрегатів.

Оснащення сільськогосподарського виробництва країни сучасною технікою і технологіями вимагає подальшого удосконалення проведення технічного обслуговування й ремонту машин. Одним із важливих резервів підвищення довговічності деталей та вузлів с.-г. техніки є використання ефективних технологій відновлення необхідних розмірів та зміцнення поверхонь деталей із застосуванням концентрованих джерел енергії. Особливоті лазерного впливу на матеріали з використанням сучасних

технологічних систем для зміцнення і відновлення деталей є актуальним питанням.

Тому, дослідження направлені на удосконалення технології лазерного наплавлення деталей сільськогосподарської техніки із зстосовуванням порошкових сумішей досить актуальні, саме вирішенню цих питань присвячена кваліфікаційна робота.

Відповідно до викладеного, у кваліфікаційній роботі сформульовано **мету дослідження**: підвищення ефективності технологічного процесу відновлення деталей машин лазерним наплавленням.

**Об'єкт дослідження**: технологія відновлення деталей машин і процес наплавлення порошковими сумішами.

**Предмет дослідження**: закономірності процесу відновлення деталей машин лазерним наплавленням.

**Методи дослідження**: методика дослідження включала теоретичні та експериментальні дослідження, що направлені на виявлення необхідних компонентів порошкових сумішей для технологічного процесу відновлення деталей машин. Також дослідження проводились з використанням законів і методів класичної механіки та математичного аналізу отриманих результатів.

**Публікації**. За результатами досліджень опубліковано тези у Збірнику доповідей учасників VI Міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи» та збірнику матеріалів науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «Студентські читання – 2022».

**Обсяг та структура роботи**. Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 42 сторінках машинописного тексту, містить 5 таблиць, 13 рисунків, списку використаних джерел з 23 найменувань.

# РОЗДІЛ 1.

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ОБРОБІТКУ

### 1.1. Аналіз застосування методів наплавлення для відновлення деталей сільськогосподарської техніки

Багато деталей сільськогосподарської техніки працюють в умовах високих динамічних навантажень, що викликає їх підвищений знос. Особливо це відноситься до групи деталей типу "вал кулачковий". Як показують дослідження І.С. Левитського ресурс розподільного валу двигуна СМД-60 складає 1740 мото-годин до капітального ремонту [1]. Одним з основних дефектів деталі є знос кулачків по висоті на робочій ділянці профілю. Для відновлення таких деталей рекомендують відновлення ручною електродуговою зваркою або вібродуговим способом. Є група кулачкових валів паливних насосів, які мають піттинговий знос поверхонь кулачків внаслідок високих контактних навантажень. До таких деталей можна віднести хрестовини карданних передач, вали перемикачів передач КПП, деталі гідроапаратури, шестерні.

Необхідно відзначити, що стосовно відновлення таких деталей доцільно використовувати прецизійні методи наплавлення. Це пов'язано з обмеженнями через порушення форми деталі (вплив термонапружень) і необхідністю наносити невеликий шар компенсаційного матеріалу на зношену поверхню [2].

Існуючі способи відновлення деталей, що працюють в умовах контактних напружень можна класифікувати згідно рис. 1.1.

Як показують дослідження, вимоги до відновлюваних деталей сільськогосподарських машин такого класу наступні: забезпечення високої міцності зчеплення між матеріалом деталі і наплавленням. Способи наплавлення достатніх фізико-механічних властивостей матеріалу (зносостійкість, контактна міцність, низькі внутрішні напруження), що наноситься, локальності нанесення присадного матеріалу, щодо невисокої вартості процесу. Метод нанесення покриття повинен бути стабільним, технологічним, мобільним по відношенню до зміни розмірів відновлюваних деталей. Аналіз існуючих методів (рис. 1.1) не дозволяє дати остаточних рекомендацій по їх застосуванню при відновленні деталей даного класу. Це також підтверджується табл. 1.1.

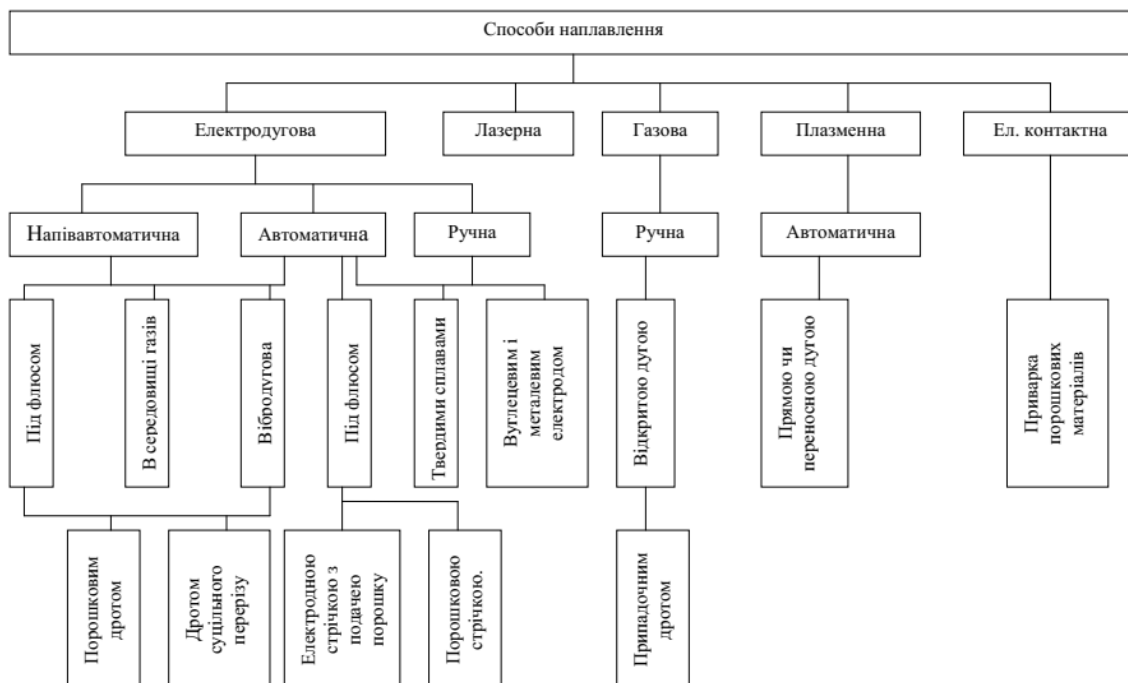


Рисунок 1.1 Класифікація способів відновлення навантажених деталей сільськогосподарської техніки

Таблиця 1.1 Характеристика методів відновлення деталей

Метод відновлення	Глибина дефектного шару
<b>Металізація</b>	
Плазменно-дугова	0,05-0,10
Електродугова	0,5-1,0
Газовая	0,05-0,10
<b>Наплавка</b>	
Електродугова під шаром флюсу	0,2-0,5
Порошковими дротами	1,2-2,4
В середовищі захисних газів	0,44-0,8
Електроімпульсна	0,2-0,4
Вібродугова	0,2-0,5
Ручна (електродами)	0,5-1,0
Плазменна	.0,1-0,3
Газовая	0,25-0,5
Електрошлакова	1,0-2,0
Лазерна	0,05-0,15
<b>Електролітичне осадження</b>	
Хромування	0,03-0,05 .
Нікелювання	0,02-0,03
Осталювання	0,03-0,05
<b>Нанесення полімерних матеріалів</b>	
Напилення	0,35-0,7
Лиття під тиском	0,15-0,21

## 1.2 Зміцнення деталей лазерним променем. Устаткування і оснащення для лазерної обробки

Лазерна обробка матеріалів і деталей машин, є новим науково-технічним напрямом технології машинобудування і інших галузей промисловості.

Основними особливостями лазерного випромінювання є його когерентність, монохроматичність випромінювання, висока густина енергії, а також спрямованість. Науковцями були проведені дослідження, які показали, що дія лазерного випромінювання на матеріали, підлягає загальним закономірностям термічної обробки. Сучасними лазерними системами можливо отримати густину потужності випромінювання порядку  $q=8 \cdot 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>, що дозволяє досягти швидкість нагріву  $2..3 \cdot 10^4$  град/с і охолодити за рахунок теплопроводу в серцевину холодного металу  $6..8 \cdot 10^3$  град/с.

Дослідженням лазерної обробки присвячені роботи О. В. Афанасьєва, О.А.Величко, Л.Ф.Головка, Н. О. Лалазарова, В.С. Коваленко, В.Е. Архипова, А.Г. Григорянца, Б.І. Сафронова, М.М. Рикаліна та ін. [3-12]. Основні методи лазерної поверхневої обробки матеріалів представлені на рис. 1.2.

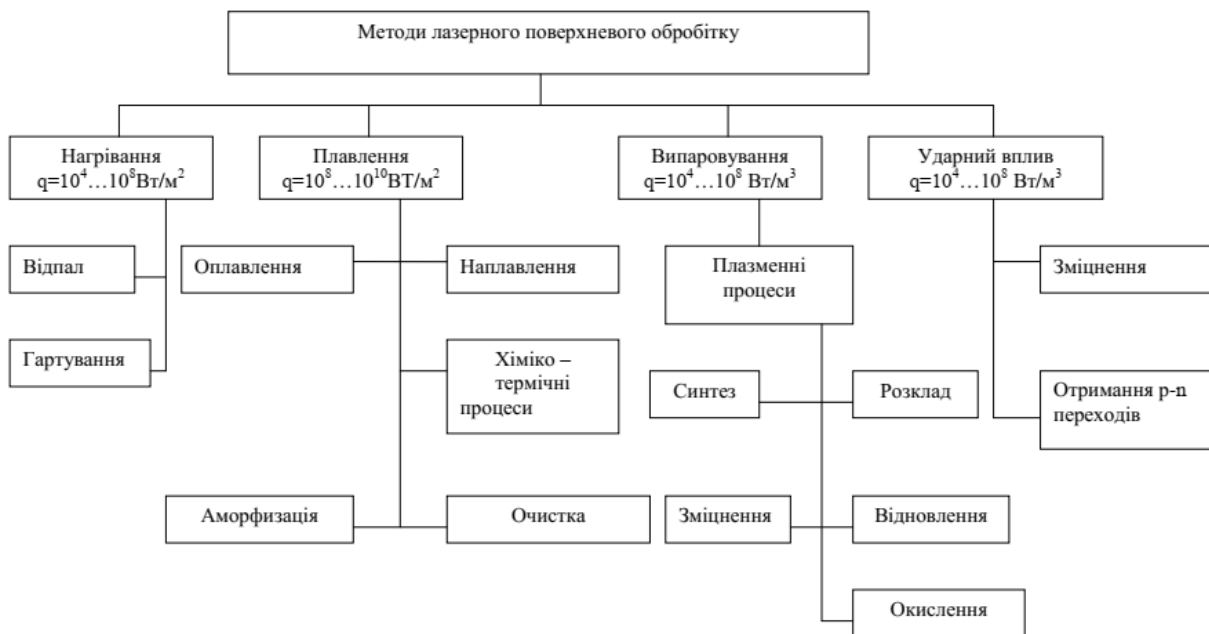


Рисунок 1.2 Класифікація методів лазерного поверхневого обробітку

При поведені аналізу методів лазерної обробки, висвітлюються групи, що засновані безумовно на нагріві та плавленні, випаровуванні й ударному впливі матеріалу, які залежать від густини потужності випромінювання і часу його дії.

Нагрівання включає в себе відпал матеріалів та метод лазерного поверхневого зміцнення з допомогою фазових перетворень у твердому стані в поверхневих шарах металів та сплавів при дуже швидкому нагріві і подальшому охолодженні.



Плавленням можна здійснити такі методи поверхневої обробки, як аморфізацію, наплавлення, легування, оплавлення заздалегідь нанесеного шару матеріалу, а також проводити лазерне очищення зерен металів і сплавів.

Процеси, що пов'язані з випаровуванням матеріалів за допомогою лазерного випромінювання, використовують для отримання чистих радіаційних матеріалів[13].

Ударна дія (навантаження), зумовлена дією "гігантських імпульсів" випромінювання та визначає ударне зміцнення матеріалів. Даний напрям зміцнюючої лазерної обробки знаходиться у стадії наукових досліджень.

Діаграми значень діапазонів густини потужності лазерного випромінювання і часу його дії при різних видах лазерної обробки приведені на рис. 1.3.

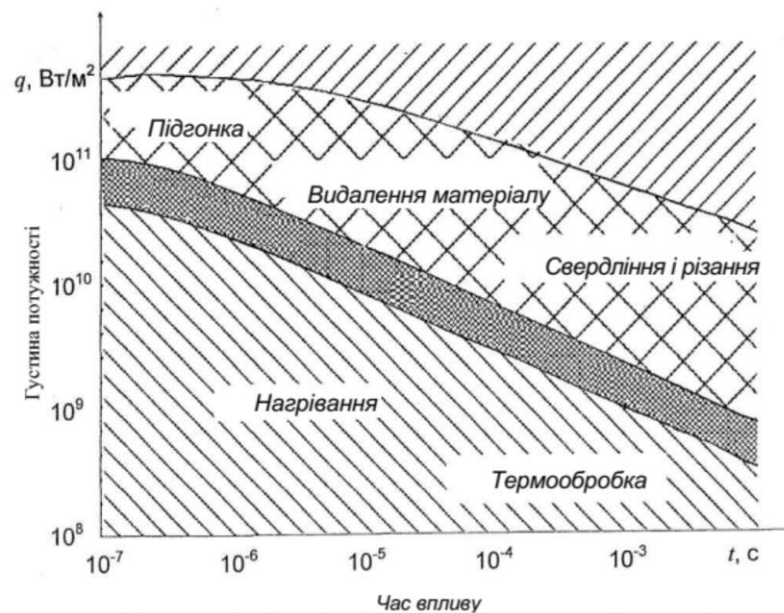


Рисунок 1.3 - Діаграма значень діапазонів густини потужності лазерного випромінювання і часу його впливу при різних видах лазерного обробітку

Для реалізації вказаних методів ЛО існує велика кількість промислових лазерів, які мають відповідні енергетичні характеристики випромінювання для взаємодії з матеріалами. Найбільша потужність випромінювання отримана у лазерів, що працюють на вуглекислому газі (CO<sub>2</sub>), рубіні, склі і алюмо-ітрієвім гранаті, легованим неодимом. З твердотілих лазерів найбільший інтерес і перспективність для технологічної мети мають лазери на алюмо-ітрієвому гранаті (АІГ). Вони можуть працювати як в імпульсному, так і в безперервному режимі (табл. 1.2). Потужність випромінювання вказаних лазерів достатня для проведення операцій гартування і наплавлення. Крім того, даний тип лазера генерує випромінювання, що добре поглинається металевою поверхнею і ККД процесу вище, ніж при обробці аналогічного матеріалу випромінюванням CO<sub>2</sub> - лазера, а по термічному впливу лазером ЛТН-103 потужністю 250 Вт обробка

сталі і чавуну еквівалентна обробці випромінюванням CO<sub>2</sub> лазера потужністю 800 Вт.

Таблиця 1.2. Основні параметри імпульсно неперервних лазерів на АІГ

Тип	Довжина хвилі, мкм	Потужність випромінювання, Вт	Розтікання випромінювання, м-рад	Маса установки, кг
ЛТН-101	1,06	63	10	200
ЛТН-102А	1,06	125	10	200
ЛТН-103	1,06	250	12	300

Проте найбільше застосування для технологічної мети отримали газові CO<sub>2</sub> лазери, що працюють на вуглекислому газі з добавками азоту і гелію. Потужність таких лазерних установок досягає 10 кВт, вони достатньо стабільні і надійні в роботі [14-16]. Основні параметри CO<sub>2</sub>-лазерів приведені в табл. 1.3.

Наявність широкої гамми лазерних установок, дозволяє вибрати тип лазера і відповідну його потужність. Окрім джерела лазерного випромінювання в технологічному ланцюзі необхідні елементи, забезпечуючі робочі функції лазерного комплексу. До них відносяться: відсікач випромінювання (заслінка), вимірник потужності лазерного випромінювання, променепроводи, фокусуюча оптика, технологічні модулі для маніпуляцій з оброблюваними деталями. Промисловістю налагоджений широкий випуск необхідного допоміжного устаткування і оснащення для лазерної обробки.

Таблиця 1.3 Основні параметри неперервних технологічних CO<sub>2</sub> лазерів

Тип	Потужність Випромінювання, кВт	Нестабільність потужності, %	Розтікаємість променя, м-рад	ККД, %	Витрата газу, м <sup>3</sup>	Потужність, кВт
ЛГН-702 "Кардамон"	0,8	3-10	3,0	8-10	0,12	10
Комета-2	1,2	2-5	3,0	10-15	0,16	30
Кипр	0,9	-	2,3	10	0,32	25
Хебр-1А	1,2	3,0	2,0	6	0,12	30
Лантан-3	3,0	-	3,0	8-10	0,1	-
ЛВКО-ЕВЕРЕТТ	10	1,0	-	5	0,1	30
НРЛ-10	10	1,0	2,5	5	0,1	50
ЛН-2.5Н1М	4	2-4	-	4	0,4	60
"Бистронік"	1.6	1.0	3.0	5-7	0.1	20

### 1.3 Лазерне наплавлення. Матеріали для лазерного наплавлення

Серед інших методів зміцнення лазерне наплавлення знаходить все більш широке застосування в промисловості і ремонтному виробництві. Процес лазерного наплавлення полягає в нанесенні на поверхню деталі наплавлювального матеріалу або подачі його безпосередньо в зону дії лазерного променя з подальшим оплавленням.

Слід зазначити, що існують граничні умови отримання міцного зчеплення наплавлювального шару з підкладкою: розплавлена ванна повинна мати температуру не нижче за температуру плавлення матеріалу основи [17].

Нанесення матеріалу може бути здійснено при використанні фізичних процесів (електролітичне осадження, газо полум'яне і плазмове напилення і т.д.) або у вигляді готової обмазки на основі склеювальної речовини (шлікера). Безпосередньо в зону дії лазерного променя матеріал, що наплавляється, може бути поданий у вигляді стрічки, дроту або порошку за допомогою транспортуючого газу. Не дивлячись на різноманітність запропонованих вище способів подачі матеріалу, в даний час найбільше розповсюдження одержує лазерне наплавлення з використанням порошкових матеріалів і нанесенням (подачею) їх на деталь або у вигляді обмазки, або подачею транспортуючого газу (газопорошкове лазерне наплавлення).

До технологічних переваг методу шлікерних обмазок слід віднести можливість нанесення матеріалу на необхідні (важкодоступні) локальні ділянки поверхні деталі, стабільний і рівномірний коефіцієнт поглинання лазерного випромінювання, порівняно легку підготовку деталі до наплавлення, яке полягає в очищенні (обезжиренні) деталі, нанесенні шлікера на зношену ділянку поверхні і оплавленні його лазерним випромінюванням. Економічну ефективність цього методу визначає практично повне усунення втрат дорогих порошкових матеріалів. Разом з тим даний метод має ряд недоліків. Так, за один прохід лазерного променя висота наплавленого валіка не може перевищувати 0,5...0,7 мм, а для отримання товстіших наплавлених шарів (1,8..2,7 мм) необхідно проводити повторне оплавлення шлікерних покриттів, що знижує продуктивність процесу. При наплавленні на робочі поверхні і значні площі, процес нанесення шлікерних обмазок також не продуктивний, бо достатньо складно витримувати їх однакову товщину.

Процес газопорошкового лазерного наплавлення набуває більше поширення на виробництві у зв'язку з високою продуктивністю. Для його реалізації створені лазерні системи необхідної потужності (до 3-5 кВт). Формування валу розплаву при цьому процесі відбувається шляхом

поступового нарощування шару від основи до поверхні, тоді як при оплавленні порошкових паст (шлікерів) наплавлення йде від поверхні до основи.

До недоліків даного методу лазерного наплавлення слід віднести значні втрати порошків, складність наплавлення невеликих локальних поверхонь на деталях з місцевим спрацюванням, підвищене тріщиноутворення вживаних сплавів.

Досить технологічно променем лазера здійснюється переплавлення напилених шарів. Проте, не дивлячись на очевидні переваги в структурі і властивостях шарів, одержуваних при лазерному переплавленні (відсутність пор, висока однорідна мікротвердість покриття, висока міцність зчеплення з основою і т.п.), необхідність застосування попередньої технології нанесення порошку (напилення) в цілому значно ускладнює обробку реальних деталей.

Встановлені витрати питомої енергії при наплавленні валу заввишки  $1 \cdot 10^{-3}$  м для ГПЛН -  $(30 \dots 50) \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>, для шлікера -  $(60 \dots 90) \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>, а для напиленого плазмового шару -  $(180 \dots 330) \cdot 10^6$  Дж/м<sup>2</sup>.

Для отримання покриттів з високими експлуатаційними характеристиками бажано застосовувати матеріали, що мають заданий хімічний склад. Аналіз застосування матеріалів показує, що при лазерному наплавленні використовують порошкові матеріали, що мають однаковий гранулометричний склад, форма частинок яких забезпечує добру сипучість порошку. При лазерному наплавленні істотне значення має технологічність процесу, не дефіцитність сировини і низька вартість порошків. У зв'язку з цим важливо провести аналіз порошків, що випускаються для газотермічного напилення, з метою встановлення можливості їх застосування при лазерному наплавленні.

З 110 типів порошків, що випускаються, до металів відноситься 7, до сплавів - 35, до оксидів - 12, до механічних сумішей - 29]. Розширення переліку порошків для газотермічного напилення відбувається в основному за рахунок розробки нових типів сплавів, композиційних порошків і механічних сумішей.

Залежно від гранулометричного складу порошки, виготовляють наступних класів: крупний (К), середній (С), дрібний (М) і дуже дрібний (ОМ)-ГОСТ 21448-75.

Найпоширенішими порошковими матеріалами, що випускаються вітчизняною промисловістю серійно, є сплави системи нікель-хром-кремній-бор. Це спеціальні сплави гомогенних властивостей, що містять флюси, для розчинення оксидів. З них одержують тонкодисперсний порошок сфероїдальної форми, який володіє доброю текучістю. Останнє дозволило стабілізувати процес наплавлення, підвищити коефіцієнт використання матеріалу, поліпшити якість наплавленого шару.

Вказані сплави мають не точку, а інтервал плавлення (950-1150°C), що зумовлює формування шару в заданих об'ємах, добра змочуваність забезпечує дифузний стан зчеплення шару з основою, з межею міцності на відрив вище 50 кг/мм<sup>2</sup>. Твердість одержаних покриттів досягає від 25 до 62 HRC<sub>э</sub>.

Іншим видом спеціалізованих матеріалів, що випускаються, для газо-термічного напилення є порошки нікель-алюмінієвих (ПН701080, ПН851015), нікель-титанових (ПН55145, ПТ88Н12) і титан-алюмінієвих сплавів (ПТ651035).

До числа композиційних порошків, технологія виробництва яких освоєна, відносяться алюмінієві порошки з нікелевою оболонкою. Плакування здійснюється контактним методом (НА-67) або розкладанням карбоніда (ПНА-75, ПНА-67, ПНА-95). Порошки використовуються для отримання проміжного шару жаростійкого покриття, а також як становлячі механічні суміші. Легування нікелевої оболонки вольфрамом, кобальтом, хромом, молібденом і титаном підвищує термостійкість і ерозійну стійкість покриттів.

Всі розглянуті види матеріалів використовуються як самостійно, так і можуть бути об'єднані в подвійні і складніші суміші. Найбільш часто сполучають тверді, зносостійкі, але крихкі компоненти з більш пластичними металами, що формують матрицю покриття. Типовими для цього варіанту є суміші карбіду вольфраму з нікелевим сплавом (ВСНГН-35, ПС-10НВК-01, ПС-12НВК-01), що самофлюсується, карбіду хрому з ніхромом або іншим жаростійким сплавом. В другому типі механічних сумішей як компонент присутні екзотермічно регулюючі композиційні порошки (типу нікель-алюміній). Їх введення покращує міцність зчеплення як покриття з підкладкою, так і частинок в об'ємі покриття між собою (когезійну міцність покриття).

Крім вищезгаданих порошків також випускаються порошкові сплави, що самофлюсуються: ПГ-АН3, ПГ-АН4, ПГ-АН6, ПГ-АН8 з підвищеним вмістом хрому (до 32%) і обмеженими домішками заліза (до 3,0%), а також сплави типу: НПЧ-1, ПНЧ-2, НПЧ-3 (ТУ48-1940-73), ПГ-10Н-03, ПГ-10Н-04 (ТУ 48-4206-156-82), які не мають в своєму складі хрому і не допускають домішки заліза.

Торезький завод наплавлювальних твердих сплавів приступив до виробництва нової гамми самофлюсуючихся сплавів, що володіють високими технологічними властивостями, як в процесі напилення, так і на зміцненій або відновленій поверхні деталі. Це новий клас терморегулюючих матеріалів для напилення на базі металлооксидних гранульованих плакированих порошків. В процесі напилення їх, використовується тепловий ефект реакції відновлення.

Проте всі ці порошки відносяться до числа дорогих і, крім того, при наплавленні деталей шаром більше 2,4 мм застосування хромбромнікелевих порошків приводить до виникнення тріщин.

Певний інтерес для використання в технології лазерного наплавлення представляють порошкоподібні наплавлювальні суміші (ГОСТ 11546-75) — УС-25, КБХ, ФБХ6-2 .

Застосування таких наплавлювальних сумішей дозволяє підвищити твердість покриттів до HRC 55, зносостійкість в 3..7 раз. Необхідно відзначити і те, що ці порошкоподібні наплавлювальні суміші мають знижену здатність самофлюсування.

З наплавлювальних твердих сплавів відомі стеліти і сормайти. Проте, ці сплави володіють високою крихкістю, у зв'язку з чим їх застосування для динамічно навантажених деталей недоцільно.

Найбільшу перспективність для отримання високоякісних, дешевих зносостійких покриттів мають порошки з Fe-Cr-B-Si сплавів, робота над створенням і вдосконаленням яких в даний час інтенсивно проводиться як на Україні, так зарубіжем.

В США випускають порошки С290,С395 і С495, призначені для нанесення покриттів на поверхні підшипників. Покриття з них мають достатньо високу стійкість до абразивного зношування, зношуванню стиранням і корозії, але, як правило, зниженим опором ударним навантаженням. В Німеччині випускають гранульовані - порошки Fe-Cr-C-B-Si сплаву марки МРА550 або МРА zis550 (тип 400Х40Р2С), призначені для покриттів на деталях, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування (направляючі ролики тракторів і ін.). При цьому покриття мають твердість HRC 60-65 і дуже високу зносостійкість, але знижений опір ударам і підвищену схильність до утворення тріщин.

Проведений літературний аналіз показує, що використання лазерного випромінювання для здійснення процесу наплавлення доцільно і технологічно вигідно. В даний час, існує ряд проблем технологічного плану, рішення яких дозволило б вирішити багато питань підвищення надійності і довговічності, як нових деталей сільськогосподарської техніки, автомобілів, тракторів, так і відновлення ресурсу зношених деталей лазерним наплавленням.

#### **1.4. Застосування лазерного наплавлення для зміцнення і відновлення деталей машин**

В промисловості відоме застосування лазерного наплавлення нікелевими порошками, що самофлюсуються, при відновленні великомодульних шестерень гірничошахтного устаткування, деталей гідроапаратури.

В Інституті електронної фізики Національної академії наук України була розроблена технологія лазерного наплавлення зношених розподільних валів

автомобілів. Використовувалася лазерна установка "Кардамон" потужність лазерного випромінювання 0,8 кВт. Технологія відновлення передбачала нанесення шлікерної обмазки з порошку на нікелевій основі ПГ-ХН80СР4 на целюлозному клеї. Твердість поверхні після лазерної обробки складала HRC<sub>э</sub>55. Ресурс відновлених валів був на рівні 90% нових.

Відоме застосування лазерного наплавлення для відновлення і зміцнення деталей нафтоперекачувальних насосів. Як шлікера використовувалася порошкова суміш ПГ-СР4 (50%) і ПГ-С1 (50%) на цапонлаці. Режимми обробки: потужність випромінювання 750 Вт, діаметр променя 3 мм, швидкість обробки 0,24 м/хв. В результаті експлуатаційних випробувань насосів було встановлено підвищення абразивної зносостійкості деталей в 2,1 рази, а корозійної стійкості в 1,3 рази в порівнянні з газопорошковим напиленням покриттів з порошку ПГ-СР4 пальниками, що працюють на ацетиленокисневій суміші.

Лазерне газопорошкове наплавлення знаходить своє застосування з використанням лазерних потужностей  $P=3,2...5$  кВт. Відоме отримання поверхневих покриттів з порошку ПГ-СР3 при лазерному оплавленні в режимах: потужність випромінювання 1,5 кВт, швидкість наплавлення 4,5... 15 мм/с, фокусна відстань оптичної системи 350...360 мм, діаметр лазерного променя 2,5 мм. Як транспортуючий газ застосовували азот. Отримані покриття мали схильність до розтріскування і тріщиноутворення. Для зменшення цього в хром-бор-нікелеві сплави вводили феросплави в кількості 3% (масової частки). Дану технологію застосовували для відновлення і зміцнення робочих фасок клапанів двигунів ЗІЛ.

Розроблена і упроваджена промислова технологія лазерного наплавлення таких відновлюваних деталей, як шарові пальці рульової трапеції тролейбусів ДАК-217Е, валів компресорів ТУ №305/Т [15]. Також відоме відновлення різьблення авіаційних болтів ТУ №299/Т методом лазерного наплавлення. Як наплавлювальний матеріал використовували порошок ПНЧ-ЗЛ наступного хімічного складу, що самофлюсується: бір -0,45%, вуглець - 2,5%, хром - 2,5%, кремній - 1,3%, мідь - 3,2%, залізо -27 1,0%, марганець - 0,4%, нікель - основа. Наплавлення проводили в два проходи при наступних режимах: потужність лазерного випромінювання 2..2,3 кВт, витрата наплавлювального порошку 0,24 г/с, швидкість наплавлення 30...40 мм/с, діаметр плями лазерного променя 2,5... 3,0 мм. Наплавлення порошкового сплаву ПНЧ-ЗЛ проводилося на пошкоджене різьблення деталі із сталі 20Х4. Результати експлуатаційних випробувань підтвердили, що їх ресурс відповідає ресурсу нового авіаційного болта.

Відоме відновлення бронзових частин струмопровідних штоків, що обертаються, і труться, способом лазерного порошкового наплавлення з подальшим чистовим шліфуванням. Наплавлення виконували в два проходи.

Перший шар виконували з малою висотою (до 0,2 мм на сторону), для чого зменшували подачу наплавлювального порошку ПГ-АН9 (ТУ ІЕС 374-83), що самофлюсується, до 0,12...0,25 г/с при високій потужності лазерного випромінювання (4,0...4,5 кВт). Подальші шари наплавляли із збільшеною масовою витратою порошку (0,25...0,50 г/с) на колишній потужності. Процес проводили при високих швидкостях подачі лазерного променя - 30..50 мм/с. При цьому були досягнуті потрібні якість і міцність зчеплення. Дефекти у вигляді короблень були відсутні. Термін служби деталей підвищився в 1,5..2раза.

Окрім лазерного порошкового наплавлення відоме застосування лазерного випромінювання в промисловості для оплавлення порошкових покриттів, нанесених за допомогою плазмової дуги, газопорошкових пальників.

Відомі дослідження по лазерному оплавленню плазмових напиленних покриттів. Плазмове напилення здійснювали на установці УМП-5 порошком, що самофлюсується, на нікелевій основі ПГ-ХН80СР-2. Товщина напиленого шару складала 1 мм, пористість 8... 30%. Лазерне оплавлення проводили в режимах: потужність випромінювання 2...3,5 кВт, діаметр сфокусованого випромінювання 0,5... 1,6 мм Після лазерного оплавлення встановлено, що структура оплавлених шарів характеризується надзвичайною дисперсністю, відсутністю оксидних включень. В оплавленому об'ємі металу пори практично були відсутні.

Застосування лазерного випромінювання 2..2,5 кВт для оплавлення плазмових порошкових покриттів ВК-20 на деталях із сталі ШХ15 [24] сприяло зменшенню пористості, усуненню тріщин і інших дефектів кристалізації, підвищенню міцності зчеплення шару, що наноситься.

Відоме застосування лазерного оплавлення порошкових сплавів, що самофлюсуються, на нікелевій основі, нанесених методом газопорошкового напилення (ГПН) на відновлювані деталі. Ресурс відновлених деталей збільшився в 3...5 раз, в порівнянні із новими виготовленими деталями без покриття.

Метод лазерного оплавлення газопорошкових покриттів застосовували для відновлення деталей нафтового устаткування. Як напилюваний матеріал використовували порошки типу ПГ-СР3, ПГ-СР4. Оплавлення проводили лазером ЛГН-702, потужністю лазерного випромінювання 0,8 кВт, діаметром лазерного променя 3 мм Структура поверхневих шарів покриттів після лазерного опромінювання при оплавленні зберігає малодисперсну будову з рівномірним розподілом кристалів зміцнюючих фаз в перенасиченому розчині на основі нікелю. Ресурс відновлених деталей підвищився в 3...3,7 рази порівняно з методом ГПН без лазерного оплавлення.



## **Висновки по розділу 1**

Аналіз літературних джерел показав, що лазерне наплавлення напилених покриттів значно покращує якість робочих поверхонь, підвищує ресурсні показники деталей, відкриває широкі можливості для конструювання композиційних покриттів. Але разом з цим, використання лазерного оплавлення нанесених порошкових покриттів вельми ускладнює технологію виробництва відновлення деталей і підвищує їх вартість, що у ряді випадків може обмежувати застосування методів при зміцненні і відновленні деталей сільськогосподарської техніки.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЛАЗЕРНИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

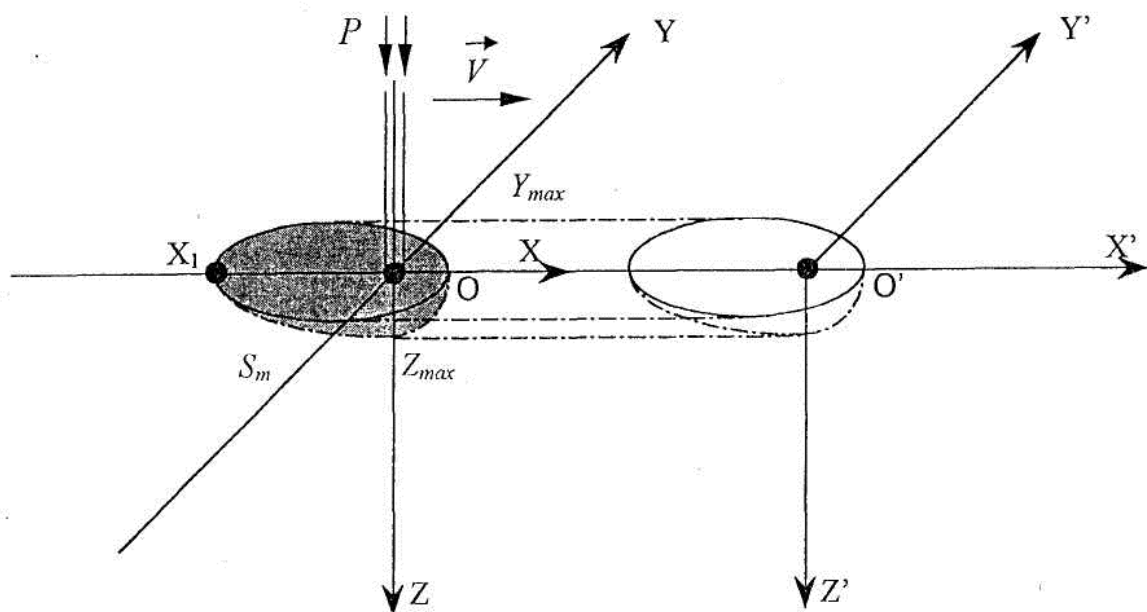
### 2.1. Теоретичні основи зміцнення робочих поверхонь, відновлюваних лазерним розплавленням шлікерних обмазок

Одним з прийнятних способів нанесення порошкових матеріалів на поверхню деталі при лазерному наплавленні може бути шлікерне покриття. Шлікерне покриття є суміш-композит, що складається з порошкового матеріалу і рідкого клею. Завдяки останньому порошкова суміш утримується на поверхні деталі і при дії концентрованого джерела енергії відбувається її оплавлення.

Для визначення технологічних параметрів протікання процесу лазерного наплавлення шлікерних покриттів була запропонована наступна теплофізична модель процесу [18]: на поверхні в зоні дії променя утворюється лунка рідкої фази, яка переміщається разом з густиною потужності лазерного променя на поверхні матеріалу.

На рис. 2.1 схематично представлена прийнята система координат, топографія лунки рідкої фази і поля температур в твердій фазі.

Лазерне випромінювання



$X, Y, Z$  - система координат зв'язана з променем (тепловим джерелом);  
 $X', Y', Z'$  - система координат зв'язана з матеріалом

Рисунок 2.1 - Схема лазерного наплавлення шлікерного покриття

Аналітично проаналізувавши і дослідивши дану модель було встановлено, що топографія температурного поля, швидкість охолодження

матеріалу, ширина і глибина області розплаву визначається співвідношенням, яке виступає як технологічний параметр лазерного наплавлення:  $\frac{P}{V}$

де,  $P$  – потужність лазера, що поглинається матеріалом, кВт;

$V$  – швидкість переміщення деталі, м/хв.

Також було отримано залежність для оцінки полів температур:

$$T(r, z) = \frac{P}{2\pi\lambda r} \exp\left(-\frac{V(r + \chi)}{2k}\right)$$

де,  $\lambda$  - теплопровідність, Вт/(м·К);

$k$  - температуропровідність;

$r$  - розмір поверхні рідинної фази;

$\chi$  - координата точки.

## **2.2. Теоретичні аспекти процесу використання порошкових сумішей для лазерного наплавлення**

Проведення процесу лазерного наплавлення порошкових сумішей вимагає надійного введення частинок порошків в зону плавлення. Це можна здійснити одним з найбільш технологічних способів - транспортування порошкової суміші струменем газу (рис. 2.2). Надійна подача порошкових сумішей в зону плавлення і управління цим процесом залежить від напрямку і швидкості транспортуючого газу, - визначаючого траєкторію руху порошкових сумішей в зоні плавлення, а також від газодинамічних характеристик струменя пари основного металу (лазерного факела), дія яких приводить 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. Проте під тиском струменя пари основного металу (факела), звичайно спрямованого нормально до поверхні зварювальної ванни, відбувається зміна напрямку руху частинок присадок, що утрудняє управління процесів транспортування порошкової суміші і приводить до зниження продуктивності і якості поверхні, що наплавляється.

Практика примусового введення порошкової суміші в зону плавлення показує, що при лазерному наплавленні основним чинником, перешкоджаючим переходу порошку в зварювальну ванну, є струмінь пари основного металу (факела), що формується над розплавом. В результаті механічної взаємодії частинок присадок з факелом відбувається відхилення їх від заданого напрямку руху, що знижує кількість порошкових сумішей, що поступають у ванну.

Відомо [19], що динаміка руху твердих тіл в струмені будь-якого газу залежить від швидкості і властивостей газу, а також від швидкості, розмірів, ваги і форми тіла, і інших чинників. Для визначення основних чинників, які впливають на рух частинок в зоні плавлення, було розглянуто взаємодію частинок із струменем пари основного металу (лазерним факелом).

На підставі механічної моделі процесу була проведена оцінка подачі порошкових сумішей в зону лазерного наплавлення. І отримано формулу для визначення часу взаємодії порошкової суміші з лазерним факелом:

$$\tau = \frac{d \cdot \cos \delta}{V_{0ч} \cdot \sin(\alpha_0 + \delta)}$$

де,  $d$  - діаметр ванни, мм.;

$V_{0ч}$  - початкова швидкість частинки, м/хв.;

$\alpha_0$  - кут між вертикаллю і початковим напрямком руху частинки;

$\delta$  - кут між вертикаллю і напрямком дії лазерного факела.

А також отримана залежність дії лазерного променя від кута нахилу сопла та швидкості транспортуючого газу:

$$\begin{aligned} X_{(\tau)} &= \frac{H \cdot \sin \delta \cdot \sin \alpha}{\sin(\alpha_0 + \delta)} + V_{0ч} \cdot \sin \alpha_0 \cdot \tau - \sin \delta \cdot \tau - \sin \delta \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{d_ч \rho_ч}{C_x \rho_1} \times \\ &\times \ln \left[ \frac{3}{4} \cdot \frac{C_x}{d_ч} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_ч} \cdot (V_1 + V_{ч0} \cdot \cos(\alpha_0 + \delta)) \cdot \tau + 1 \right] + \\ &+ \sin \delta \cdot (V_1 + V_{ч0} \cdot \cos(\alpha_0 + \delta)) \cdot \tau + 1 \\ Z_{(\tau)} &= \frac{H \cdot \sin \delta \cdot \cos \alpha}{\sin(\alpha_0 + \delta)} + V_{ч0} \cdot \cos \alpha_0 \cdot \tau - \cos \delta \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{d_ч \rho_ч}{C_x \rho_1} \times \\ &\times \ln \left[ \frac{3}{4} \cdot \frac{C_x}{d_ч} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_ч} \cdot (V_1 + V_{ч0} \cdot \cos(\alpha_0 + \delta)) \cdot \tau + 1 \right] + \\ &+ \cos \delta \cdot (V_1 + V_{ч0} \cdot \cos(\alpha_0 + \delta)) \cdot \tau + 1 \end{aligned}$$

де  $H$  - рівень, на якому знаходиться поверхність ванни, мм;  $V_1$  - швидкість руху парів в лазерному факелі, м/с;  $C_x$  - коефіцієнт лобового опору частинки;  $\rho_ч$  - густина матеріалу частинки, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_1$  - густина парів основного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $d_ч$  - діаметр частинки, мм

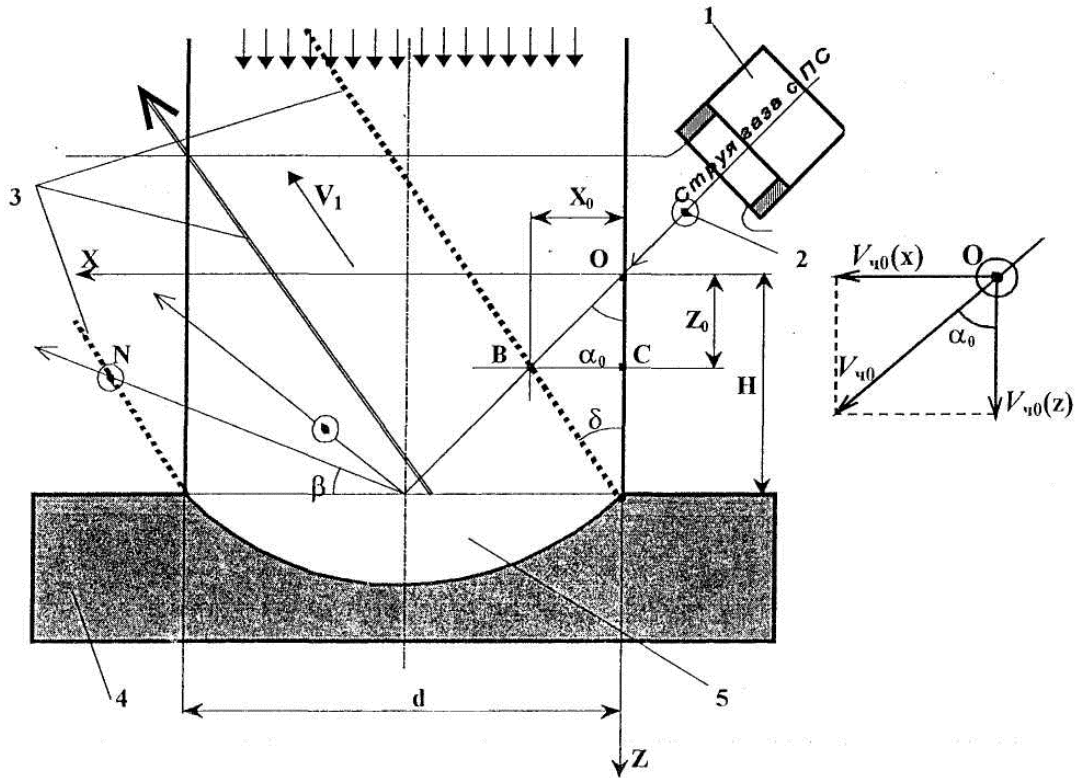


Рисунок 2.2 - Схема взаємодії частинок порошкової суміші з факелом: 1 – сопло формуюче газопорошковий потік; 2 – частинка порошкової суміші; 3 – струя парів основного металу; 4 – основний метал; 5 – зварювальна ванна.

### 2.3 Вибір і розрахунок технологічних параметрів лазерної наплавки

Для процесу лазерного наплавлення одним з основних енергетичних параметрів, що визначають технологічність процесу, є необхідна густина потужності випромінювання  $q_H$  :

$$q_H = 2\pi\lambda T_m Z_{\max}$$

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

$T_m$  — температура плавлення металу, К;

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

Якщо ефективну теплову потужність  $Q_H$  пов'язати з потужністю випромінювання  $P$  [20], то можна отримати наступний вираз:

$$Q_H = \eta_{\text{эф}} P_o$$

де,  $\eta_{\text{эф}}$  — термічний ККД наплавлення;

$P_o$  — потужність лазерного випромінювання, Вт

Для лазерної обробки, пов'язаної з розплавленням металів термічний ККД є відношенням теплоти, необхідної проплавлення, до всієї теплоти, введеної у виріб:

$$\eta_{\text{эф}} = \frac{V \cdot F_{\text{np}} \cdot S_{\text{nl}}}{P_o}$$

де,  $V$ — швидкість лазерного наплавлення, м/с;

$F_{\text{np}}$ — площа поперечного перетину проплавленої зони металу,

$S_{\text{nl}}$ — питоме об'ємне теплосодержание розплавленого метала, включаючи приховану теплоту плавлення, Дж/м<sup>3</sup>.

Враховував [21-23], що густина потужності є комбінований показник, залежний від співвідношення потужності лазерної установки ( $P$ ) діаметра ( $d$ ) лазерного пучка на фокусуючій оптиці, маємо:

$$q_t = \frac{4PK_H}{\pi d^2}$$

де  $K_H$ — коефіцієнт, характеризуючий процес лазерної наплавки.

В загальному випадку  $K_H$  визначається через продуктивність процесу  $G_H$ :

$$K_H = \frac{G_H}{P}$$

де  $P$ — робоча потужність випромінювання, Вт.

Зв'язуючи  $q_H$  із швидкістю лазерної дії, одержуємо технологічно показник процесу лазерного наплавлення — питому енергію наплавлення  $E_H$

$$E_H = \frac{\pi q d K_H}{2V_H} = \frac{PK_H}{V_H d}$$

висоту наплавленого валу, з урахуванням введеної кількості тепла, можна визначити з виразу:

$$h_H = \frac{P_o \cdot n_{\text{эф}}}{V \cdot \rho \cdot m_{\text{nl}} \cdot B}$$

де,  $P_o$ — ефективна потужність променя, Вт;

$\rho$ — густина основного металу, кг/м<sup>3</sup>;

$m_{\text{nl}}$ — теплосодержание основного металу, Дж/кг;

$B$ — ширина валу, що наплавляється, м

## Висновки по розділу 2.

В даному розділі було теоретично обґрунтовано основи зміцнення робочих поверхонь, відновлювальних лазерним розплавленням лікерних обмазок та проаналізовано процес подачі порошкових сумішей в зону лазерного наплавлення, а також підібрано і розраховано параметри лазерної наплавки.

### РОЗДІЛ 3. ОБГРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПРОЦЕС НАПЛАВКИ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ

#### 3.1 Лазерне устаткування для проведення наплавлення

Лазерне наплавлення деталей виконується на лазерному технологічному комплексі (ЛТК), який включає лазерну установку з необхідними системами забезпечення: оптичний блок, технологічний модуль.

Функціональна блок-схема ЛТК приведена на рис. 3.1.

В лазерній установці застосовували лазер "Іглан" (ЛН-2.5НМ) потужністю випромінювання до 2,5 кВт. Цей лазер володіє більш простою конструкцією, кращою стабільністю параметрів в часі, а також великим технічним ресурсом (до 5000 год.). Модулятор блоку живлення забезпечує роботу лазера в моноімпульсному, імпульсному і безперервному режимах. Для більшого підвищення потужності випромінювання газорозрядні камери зібрані з 30 трубок невеликого діаметра із збудженням газової суміші електричним розрядом постійного або змінного струму.

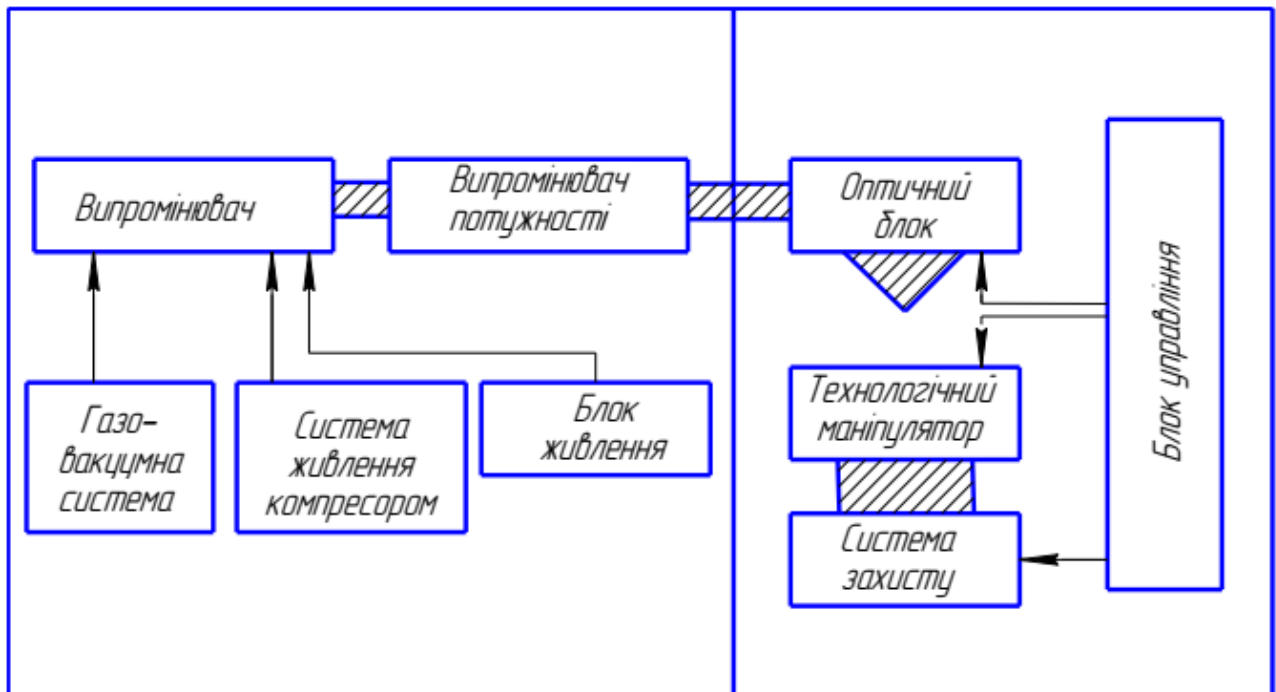


Рис. 3.1. Функціональна блок-схема ЛТК

Наповнення випромінювачів газовою сумішшю проводиться за допомогою газовакуумної системи (ГВС). Вона складається з систем відкачування і напуску газової суміші, має автоматичне і ручне управління. Для транспортування лазерного променя до поверхні деталі, його

перетворення на оптичних елементах (поворот променя, фокусування), регулювання процесом лазерної обробки використовується оптична система, що складається із заслінки відсікача, лінзи з КС1 з фокусною відстанню  $P=500$  мм, мідного дзеркала на інварній основі.

Технологічний модуль складався з верстата-маніпулятора з необхідним діапазоном швидкостей обертання шпинделя і подачею оптичного блоку.

Контроль за забезпеченням параметрів лазерної обробки виконується за допомогою приладу ТИ-4 - вимірника потужності лазерного випромінювання. Його характеристики: межі вимірювань потужності - до 5 кВт, розрахункова довжина хвиль лазерного випромінювання - 0,4...11,0 мкм, приймач випромінювання є охолоджуваним конусом. Прилад оснащується гальванічним мікровольтметром, відрегульованим на пряме вимірювання потужності (Вт) . Зміну діаметра плями лазерного випромінювання проводиться лінійним переміщенням лінзи щодо дзеркала і деталі в межах фокусної відстані. Для контролю розмірів плями використовується біноклярний стереоскопічний мікроскоп МБС-2 з діапазоном збільшень  $\times 3,5..88$  і фокусною відстанню 160 мм.

### **3.2 Оптимізація режимів нанесення лазерного покриття**

Більшість відповідальних деталей сільськогосподарської техніки виготовляється з якісних вуглецевих сталей і високоміцних чавунів. Виходячи з цього, даліше розглянемо вплив параметрів технологічного процесу лазерного наплавлення і характеристику поверхонь відновлених, і зміцнених лазерним наплавленням на зразках із сталі 45 ГОСТ 1050-79, 40Х ГОСТ 4543-79, ШХ15 ГОСТ 801-78, високоміцного чавуну ВЧ 50 ГОСТ 7293-85 [24].

#### **3.2.1 Оцінка температурних полів при лазерній обробці**

Важливим чинником, що визначає стан поверхні деталі при лазерному наплавленні, є температура і її розподіл по зміцнюваній поверхні. Характер розподілу температури істотно впливає на фізико-механічні властивості шарів, що наплавляються, і відповідно, на якість відновлених деталей.

Оцінка температурної дії на металеві поверхні при обробці лазерним променем є одним з факторів, що дозволяє виявити умови проведення наплавлення, пошуку зони оптимальної технології лазерної обробки.

Результати дослідів розподілу температурного поля лазерного випромінювання (ЛВ) по глибині для сталевих і чавунних зразків представлені на рис. 3.2. Залежність нагріву сталевих і чавунних поверхонь від швидкості



обробки і діаметра лазерного променя відображена на рис. 3.3 (а) і (б) відповідно.

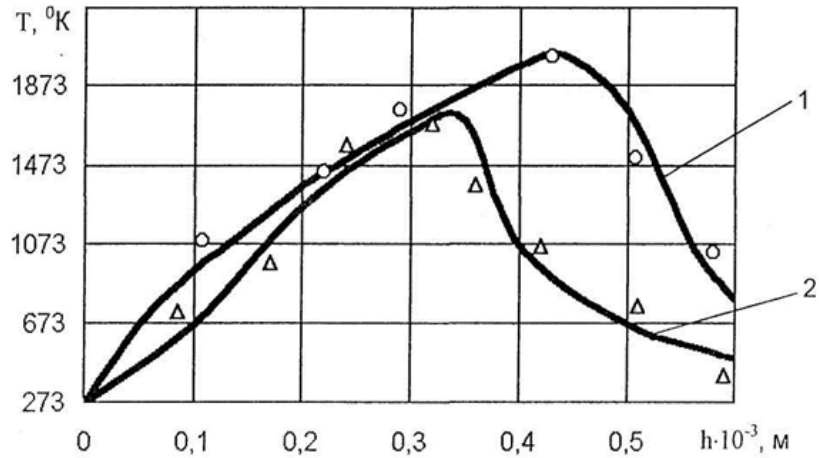
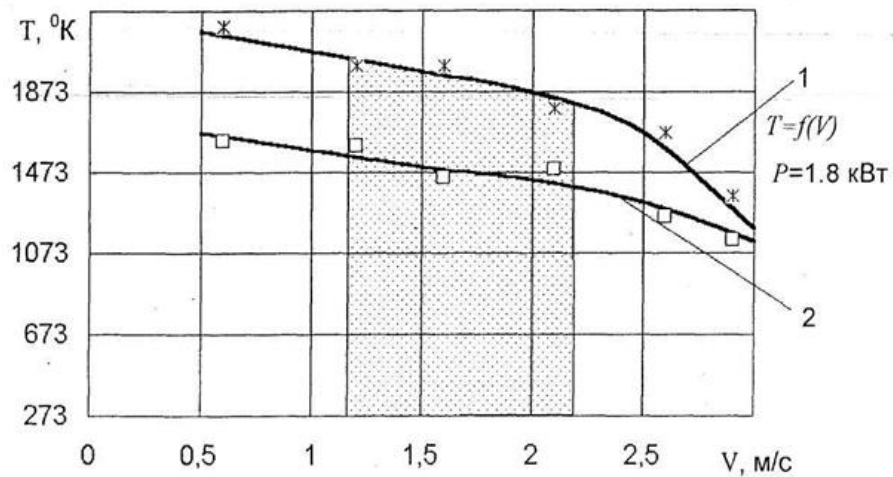
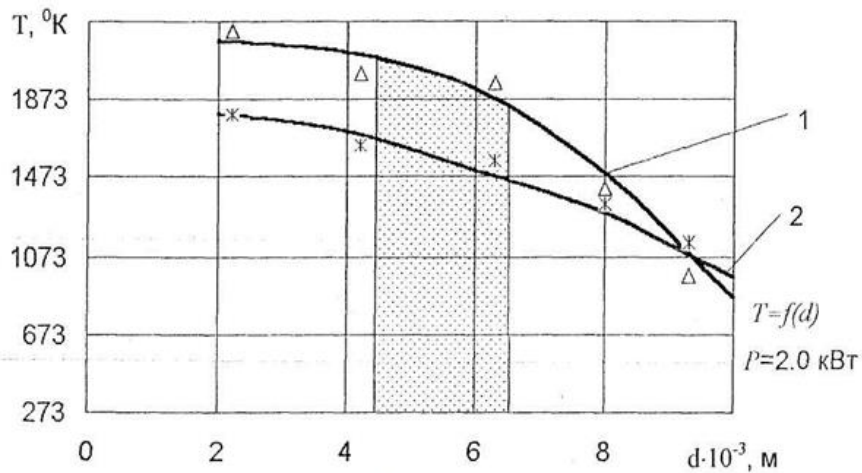


Рисунок 3.2 - Розподіл температурного поля ЛВ по глибині сталюго (1) і чавунного (2) зразків ( $P=1,8$  кВт,  $V=2,5$  м/с,  $l=0,05\dots 2,0$ )



а



б


 - зона квазіоптимальних режимів лазерної обробки

Рис. 3.3 – Залежність нагріву поверхні сталюих (сталь 45 (1)) і чавунних (ВЧ-50 (2)) зразків від швидкості переміщення  $V$  (а) і діаметра випромінювання  $d$  (б)

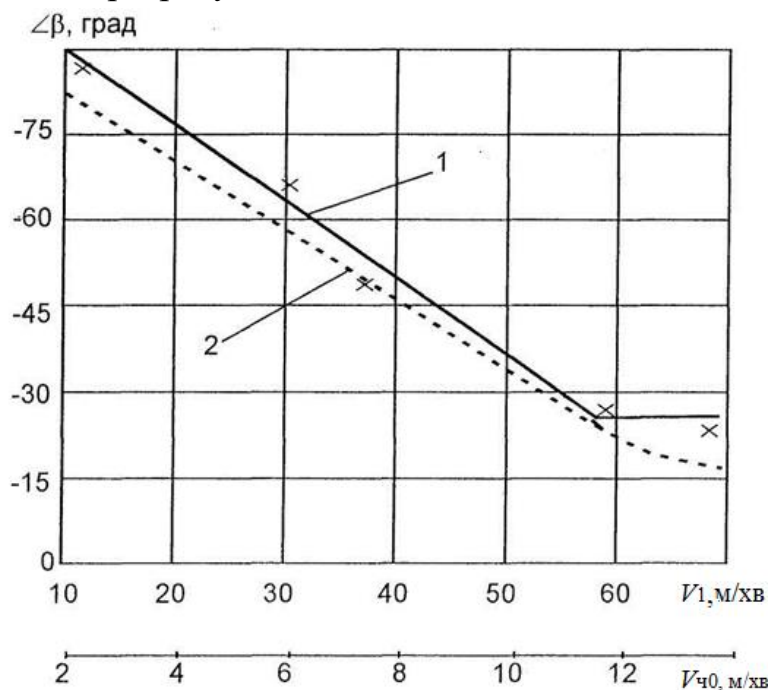
Аналіз температурного поля показує, що є тенденція до утворення ядра розплаву на деякій глибині, що пов'язано з явищем акумуляції теплоти в приповерхневому шарі. Для чавунного зразка наростання моменту утворення зони розплаву більш круте, що можна пояснити теплофізичними характеристиками цього матеріалу.

Аналіз залежностей представлених на рис. 3.3 свідчить про існування області квазіоптимальних режимів лазерної обробки, при яких реалізується процес оплавлення покриття.

### 3.2.2 Результати аналізу процесу подачі частинок ПС в зону лазерного наплавлення

Для забезпечення найбільш ефективного використання порошкових сумішей, і зменшення втрат дорогих порошкових сумішей, необхідно визначити оптимальні значення параметрів що впливають на траєкторію руху частинок порошкової суміші в зоні плавлення. А саме, залежність кута вильоту частинок порошку від швидкості руху порошкової суміші (ПС).

На рис. 3.4 відображено залежність кута вильоту частинок порошкової суміші з факела від їх початкової швидкості. Експериментальна крива отримана внаслідок проведення дослідів, а розрахункова побудована внаслідок аналітичних розрахунків.



Криві: 1 - експериментальна, 2 - розрахункова

Рисунок 3.4 – Залежність кута вильоту частинок ПС з факела від їх початкової швидкост

### 3.2.3 Вибір матеріалів для лазерного наплавлення і оптимізація складу порошкових сумішей

Для лазерного наплавлення використовуються порошкові наплавлювальні сплави на нікелевій основі ПГ-Н70Х17С4Р4 ТУ 14-127-185-82, на залізній основі ПГ-ФБХ6-2 ГОСТ 11546-75.

Для вищої якості наплавлення з даних порошків готуються порошкові суміші, до складу яких вводиться порошковий алюміній ПАД ТУ 48-01-82-71 для підвищення якості шарів, що наплавляються.

Аналіз результатів дослідження дозволяє відзначити, що найменше число утворення тріщин залежить від процентного вмісту порошку ПГ-ФБХ6-2, процентного вмісту порошку ПГ-Н70Х17С4Р4, швидкості обробки, процентного співвідношення порошку ПАД. Помітно впливають на тріщиноутворення подвійна взаємодія між процентним вмістом порошку алюмінію і швидкістю обробки.

Як показує практика порошкова суміш для лазерного наплавлення оптимального складу містить ПГ-ФБХ6-2 - 68..73%, ПГ-Н70Х17С4Р4 - 25..30%, ПАД - решту.

Для проведення наплавлення здебільшого використовується два способи нанесення порошку для наплавлення, на поверхню деталей.

Перший спосіб – нанесення шлікерної обмазки. Як зв'язуючий компонент при виготовленні обмазки можна застосовувати різні речовини (силікатний клей, рідке скло), але найбільш доцільно використовувати клей на целюлозній основі - карбоксиметилцелюлозу (КМЦ). Ця речовина вигоряє при температурі 300...400 °С і не впливає на хімічний склад шару, що наплавляється. Вона стійка до температури (не спучується) при нагріві деталі, добре наноситься на поверхню і значно покращує поглинаючу здатність обмазки. Клей КМЦ перед приготуванням розминається до невеликих зерен  $(3..5) \cdot 10^3$  м і розбавляється гарячою водою в співвідношенні 1:10 за об'ємом. На знежирену поверхню деталі (валом, тампоном) наноситься клей і проводиться подача порошку з бункера (рис. 3.5). Можна наносити на поверхню деталі готову обмазку. В цьому випадку в готовий клей додається порошок і доводиться до необхідної в'язкості. Готову обмазку наносять на деталь пензлем або іншим пристосуванням. Обробку поверхні лазерним променем можна проводити як після нанесення обмазки (порошку), так і після просушування. На режими обробки і якість шару це не впливає.

Як другий спосіб нанесення порошку застосовується газопорошкове вдування в зону лазерного променя порошковим живильником. Як газ використовується повітря, аргон, при тиску 0,05..0,1МПа.

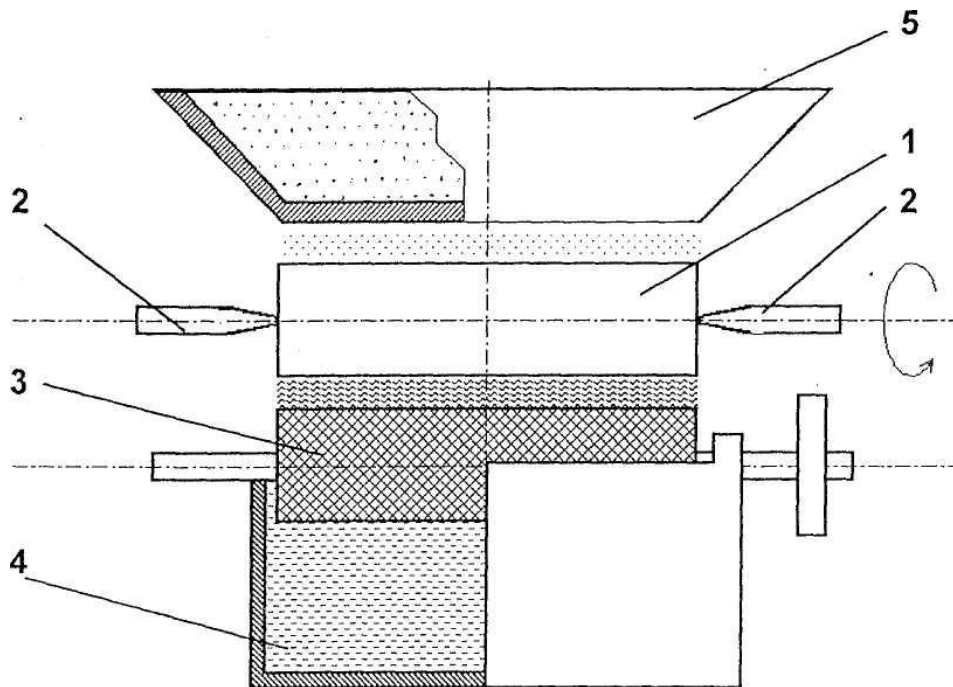


Рис. 3.5 - Принципова схема нанесення шлікерної обмазки на відновлювану деталь: 1 – відновлювальна деталь; 2 – центра; 3 – обмазувальний вал; 4 – ванна з мастилом; 5 – бункер з порошком

### 3.3. Характеристика основних властивостей покриттів

Міцність зчеплення є однією з найважливіших характеристик, що визначають працездатність покриття.

Міцність зчеплення при лазерному наплавленні порошками на нікелевій основі складає 239 МПа, що на 33 % менше міцності зчеплення при наплавленні порошку ПГ-ФБХ6-2 (354 МПа). Наплавлення порошковою сумішшю оптимального складу має міцність зчеплення 312 МПа на 12% меншу, ніж у наплавлення ПГ-ФБХ6-2.

За даними робіт відомо, що межа витривалості наплавленого матеріалу при використанні методів електродугового наплавлення знижується на 20-70% в порівнянні з основним матеріалом. Однією з причин цього є наявність несприятливої зони залишкових напружень (понад 240 МПа).

При лазерному наплавленні вивчалися напруження першого роду, що визначають в значній мірі напружений стан поверхневих шарів. Розподіл залишкових макронапружень по глибині наплавленого шару представлені на рис. 3.6.

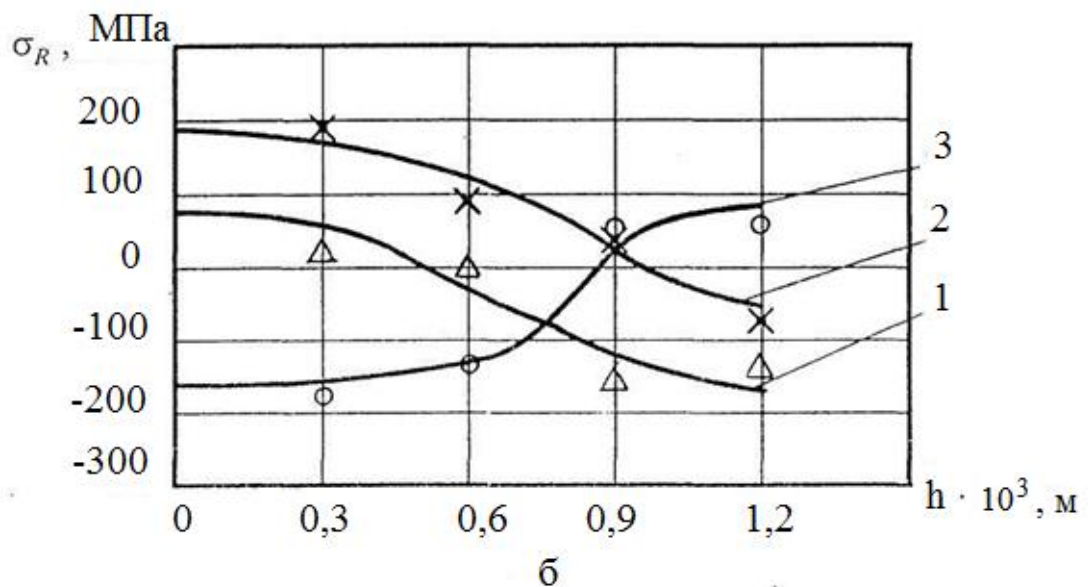
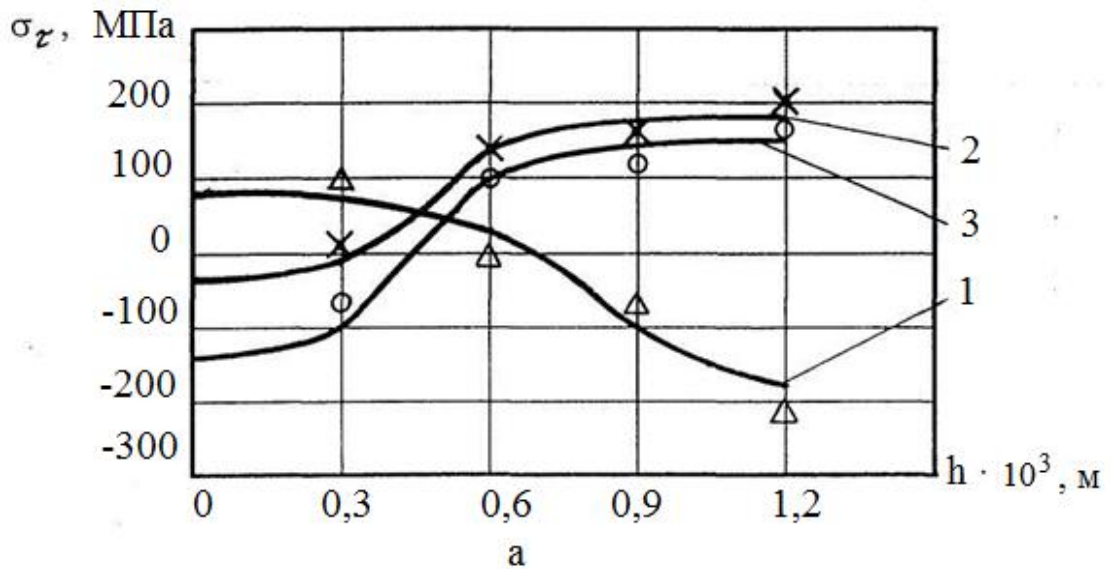


Рисунок 3.6 - Розподілення залишкових макронапружень по глибині:  
 а - тангенціальні, б - радіальні; 1) ПГ-Н70Х17С4Р4; 2) ПГ-ФБХ6-2; 3) ПГ-  
 ФБХ6-2 (70%)+ПГ-Н70Х17С4Р4(25%)+ПАД(5%)

Якнайменше значення залишкових напружень отримано при нанесенні покриттів з порошку на нікелевій основі, що зв'язано, мабуть, з меншим енергетичним внеском в зразок і, відповідно, меншою і більш ізотропною зоною термічного впливу. Порошки на залізній основі при плавленні вимагають великих енергетичних витрат тому утворюється велика зона термічного впливу, що, зрештою, дає більш значне зниження характеристик опору втомленості. Сумарне значення розподілу залишкових напружень першого роду по товщині наплавленого шару при наплавленні порошоків приведено на рис. 3.7.

Підвищення довговічності сполучення "кулачок розподільного валу - штовхач клапана" є одним з найскладніших питань при ремонті двигуна СМД-

60. Довговічність сполучення забезпечується зносостійкістю його складових. Тому при відновленні розподільних валів, деталей гідравлічних пристроїв важливу роль грає вибір матеріалу для покриття зношених поверхонь кулачків. В основному вибір матеріалу проводиться по твердості і на підставі вивчення працездатності пар, що труться. Одним з чинників, що визначають працездатність пар, що труться, є знос.

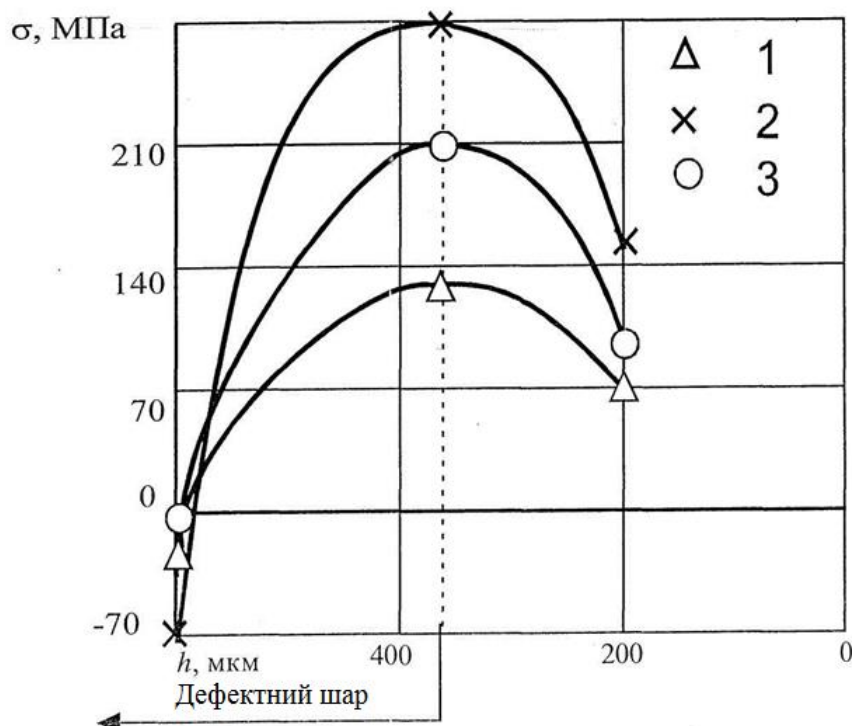


Рисунок 3.7. Розподіл кінцевих напружень першого роду по товщині наплавленого шару при наплавці порошків: 1- ПГ-Н70Х17С4Р4; 2 – ПГ-ФБХ6-2; 3 – ПГ-ФБХ6-2 (70%)+ПГ-Н70Х17С4Р4(25%)+ПАД(5%)

Як наголошувалося, структура наплавлення на основі нікель-хром-бір-кремнієвих самофлюсуючихся порошків типу ПГ-Н70Х17С4Р4, є твердим розчином хрому в нікелі з невеликим вмістом карбиду ( $\text{Cr}_2\text{ZrC}_6$ ) і інтерметалідної ( $\text{CrNi}$ ) складових при твердості від HRC 40 до HRC 58. Твердість кожного шару істотно залежить від режимів наплавлення, ступені розчинення карбиду і боридної фаз, характерних для вихідного матеріалу і ступеня вигорання вуглецю і бору. Твердість наплавлення з ПГ-ФБХ6-2 мало залежить від режимів наплавлення і складає HRC 52...65. Навіть в широкому діапазоні режимів процесу наплавлення не вдається добитися повного розчинення частинок заліза в нікелевій основі, що значною мірою обумовлене великою відмінністю температур плавлення початкових порошків. При наплавленні порошкових сумішей в структурі шару на основі порошків ПГ-Н70Х17С4Р4 і ПГ-ФБХ6-2 з твердістю до HRC 58 спостерігаються окремі включення частинок порошку ПГ-ФБХ6-2 з твердістю до HRC 70, які при



найжорсткіших енергетичних характеристиках наплавлення частково розчиняються на межі з матрицею, але в цілому по хімічному складу відповідають початковій структурі порошку на основі заліза. Наявність такої композиційної структури пропонує можливість отримання високих триботехнічних властивостей.

Як показують представлені на рис. 3.8 залежність зносу зразків (виготовленні з опорних шийок розподільчого вала з різним типом обробки) при лазерному наплавленні виявився для ПГ-Н70Х17С4Р4 (2) в 1,7 рази і для порошкової суміші ПГ-ФБХ6-2+ПГ-Н70Х17С4Р4+ПАД (3) в 2,7 рази менше зносу зразків загартованих ТВЧ (1). Зносостійкість контрзразків (виготовленні з штовхачів, п'яти, яких наплавленні легованим чавуном) працюючих в парі з наплавленими зразками (2) виявилася в 1,5 рази, а з наплавленими зразками (3) в 1,7 рази вище за зносостійкість контрзразків, що працювали в парі із зразками (1), зміцненими ТВЧ.

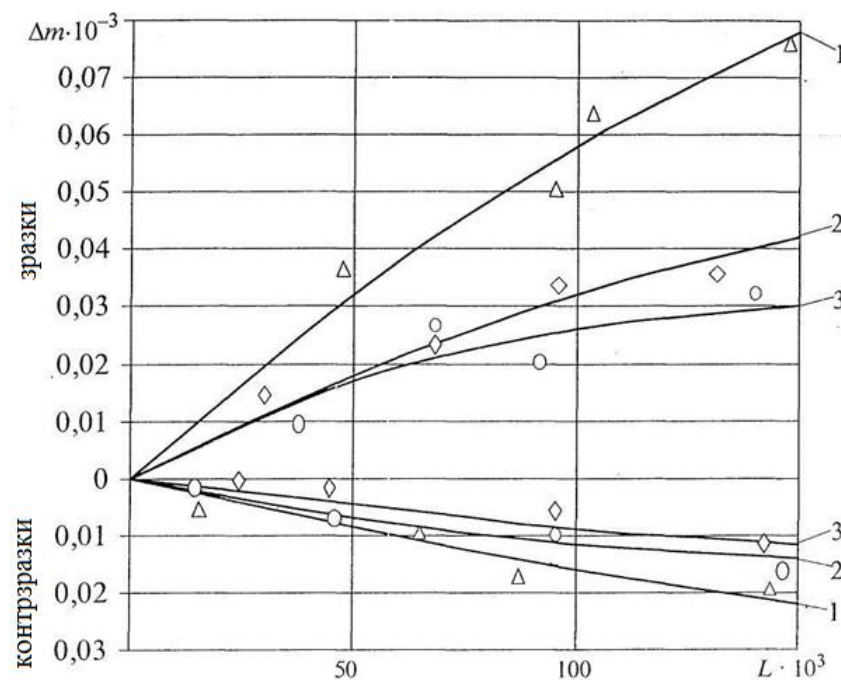


Рисунок 3.8 – Залежність зміни втрати маси зразків і контрзразків від шляху тертя: 1 - сталь 45; 2- ПГ-Н70Х17С4Р4; 3 - ПГ-ФБХ6-2 (70%)+ПГ-Н70Х17С4Р4(25%)+ПАД(5%)

Підвищення зносостійкості наплавлених поверхонь можна пояснити більш високою твердістю, формуванням текстури покриттів. Як відомо, текстуровані покриття більш зносостійкі порівняно з нетекстурованими. Більш висока зносостійкість лазерних покриттів з порошкових сумішей ПГ-ФБХ6-2+ПГ-Н70Х17С4Р4+ПАД порівняно з покриттями з шликерних порошоків, що самофлюсуються, можна пояснити схильністю нікелевої пластичної основи до

схвачування при короткочасних високих навантаженнях. Ця властивість структур на основі нікелю виявляється в умовах недостатнього мастила.

### **3.4 Вибір і обґрунтування номенклатури деталей сільськогосподарських машин для лазерного відновлення**

При виборі деталей сільськогосподарської техніки, відновлюваних лазерним наплавленням, необхідно враховувати особливості технології, що розробляється: деталі повинні бути відповідальними, працювати в тяжких умовах, площа відновлюваних поверхонь - відносно невелика, але місця відновлення труднодоступні, величина зносу може бути від 0,1 мм до 1 мм. Матеріал відновлюваних деталей - високовуглецеві леговані сталі і чавуни.

Дані випробувань сільськогосподарських машин в експлуатаційних умовах показують, що такими характерними деталями можуть бути кулачкові вали різних типів, деталі гідросистем різних конструкцій (золотники гідророзподільників, шестерні гідронасосів, втулки торцевих ущільнень гідротрансмісії), розподільні вали ДВС сільськогосподарських машин.

На більшості самохідних сільськогосподарських машин застосовується гідростатична трансмісія ГСТ-90, для приводу провідних коліс. Дослідження по випробуваннях машин у виробничих умовах доводять, що надійність ГСТ-90 недостатньо висока, а напрацювання повністю по групах сільськогосподарських машин знаходиться в межах 76... 100 мотогодин.

Більше 17% відмов по гідротрансмісіях приходить на знос золотникових пар, втулок торцевих ущільнень. Це пояснюється, з одного боку, складними умовами роботи деталей (хвильові ударні процеси абразивна дія в гідравлічному середовищі) і, з другого боку необхідністю використання деталей з особливо якісних матеріалів (легованих сталей, високоякісних чавунів) з високим ступенем точності виготовлення.

Застосування традиційних методів відновлення, таких як гальванопокриття, дугові види наплавлення, для цих деталей малоприсадибні по ознаках не технологічності, неможливості досягнення високої міцності.

Серед ДВС сільськогосподарських машин на частку газорозподільного механізму (ГРМ) доводиться 25...27% відмов від загального числа відмов двигуна. Основною деталлю ГРМ є розподільний вал, довговічність якого визначається інтенсивністю зносу його кулачків і опорних шийок. За даними досліджень для двигуна СМД-60 знос опорних шийок вельми незначний і для більшості розподільних валів лежить в межах допуску. В той же час, встановлено, що знос кулачків по середніх значеннях невеликий, але по максимальних величинах значний. Середньомаксимальний знос кулачків



досягає (0.9...1.5) $\cdot 10^3$  м. Таким чином, для підвищення загального терміну служби двигуна потрібне підвищення зносостійкості відновленого сполучення "кулачок-штовхач".

Досягши величини зносу більше граничної, відновлення ведуть, використовуючи різні види наплавлень (вібродугову, під шаром флюсу або газу, газополум'яну, плазмову), електроконтактне напикання порошків, гальванопокриття. Загальним недоліком способів заснованих на використуванні дугових зварювальних процесів, є значні деформації розподільних валів, великі припуски на механічну обробку, не завжди забезпечується достатня зносостійкість, твердість і контактна міцність нанесеного шару. Гальванопокриття не забезпечують необхідній міцності зчеплення з основою через високі контактні напруги на вершинах кулачків. Аналогічна картина спостерігається при роботі паливної апаратури у кулачків паливних насосів. Є також складні дорогі деталі з невеликими поверхнями, що зношуються, відновлення яких звичайними методами утруднено. В якості такої деталі може служити вторинний вал КПП трактора Т-150К. Поверхні при відновленні звичайними методами наплавлення перегріваються, відбувається викривлення деталі. Для відновлення зношених поверхонь таких деталей пропонується використовувати лазерне наплавлення.

На підставі аналізу особливостей роботи ряду деталей гідро трансмісії, гідророзподільника, дизельної паливної апаратури, ГРМ двигунів сільськогосподарських машин, їх зношування і відмов проведений вибір номенклатури деталей, що підлягають відновленню лазерним наплавленням (табл. 3.1).

### **3.5. Дефекти розподільчого валу і способи їх усунення**

Розподільчий вал виготовляють штампуванням із сталей 40, 45 для більшості тракторних і автомобільних двигунів або із спеціального чавуну. Основні дефекти розподільного валу: згин, знос і відколювання опорних шийок і кулачків; знос посадочного місця і канавки шпонки під розподільну шестерню (перевіряють при ослабленні посадки шестерні або при її вибракуванні); знос або пошкодження різьби.

Вал вибраковують при тріщинах, аварійному згині або скручуванні, зламі і при відколах металу по торцях вершин кулачків більше 3 мм на ширині кулачка.

Зношені кулачки шліфують до виведення слідів зносу і відновлення профілю кулачка. Після шліфування кулачка висота підйому клапана не змінюється.

Таблиця 3.1 - Номенклатура деталей сільськогосподарської техніки підлягаючих відновленню лазерним наплавленням.

Найменування деталі матеріал	Номер по каталогу	К-ть на вузол	Зона відновлення	Знос мм	Необхідна твердість	Спосіб подачі порошку
Гідростатична трансмісія ГСТ-90						
1.Сервопоршень, ВЧ-45	НП90-09.001	2	Знос зовнішньої поверхні	0,014	160-220 НВ	Г
2. Розподільник, 18ХГТ	НП90-00.001	2	Знос зовнішньої поверхні	0,02	56-62 НРСэ	Ш/Г
3. Втулка торцевого ущільнення. ШХ-15	НП90-04.003	2	Знос поверхні сполучення, знос паза	0,18 0,13	56-62 НРСэ	Ш
Гідророзподільник Р-75-В3						
4.Золотнік гідророзподільника,	Р-75-80245	3	Знос зовнішньої поверхні	0,05	56-63 НРСэ	Ш/Г
5.Клапан перепускний, ШХ-15	Р-75-0416	3	Знос конічної поверхні	0,5	50-55 НРСэ	Ш/Г
Шасі трактора Т-150						
6.Барабан фрикціона, Сталь 40Х	150.37.140-1	4	Знос внутрішньої поверхні під диски	2,0	50-56 НРСэ	Г
7. Блок шестерень КПП, Сталь 40Х	151.37.061-30	1	Знос паза по ширині під вилку	0,87	50-55 НРСэ	Г
8.Вторинний вал КПП, Сталь 40Х	150.37.037	1	Знос канавок під ущільнюючі кільця	0,25	45-50 НРСэ	Ш

## Продовження таблиці

Найменування деталі, матеріал	Номер по каталогу	К-ть на вузол	Зона відновлення	Знос мм	Необхідна твердість	Спосіб подачі порошку
9.Хрестовина кардана, ШХ-15	150.36.115	6	Поверхня під підшипники 164- 220.1044	0,03	55-60 HRCэ	Г
Шасі трактори МТЗ-80						
10. Вилка перемикачів КПП, Сталь 45	36-1702024	2	Знос поверхні щок по товщині	2,0	45-50 HRCэ	Ш
11. Сателіт ЗМ, Сталь 40Х	36-2403024	2	Поверхня під підшипник	0,2	55-60 HRCэ	Г
Паливний насос УТН-5						
12. Вал кулачковий, Сталь 45	УТН-3-111152А	1	Вершина кулачка	2,6	50-55 HRCэ	Г
Двигун СМД-60						
13. Вал розподільчий, Сталь 45	60-05.001	1	Вершина кулачка	3,0	50-55 HRCэ	Г
Стартер пускового двигуна ПД-10						
14.Якор стартера, Сталь 40Х	СТ-212-Р	1	Поверхня під підшипник ковзання	0,2	45-50 HRCэ	ГУШ

Ш - шлікерна обмазка  
Г - газопорошкове лазерне  
наплавлення

При подальшому шліфуванні значно зменшується радіус вершини кулачка. Кулачок стає гострим, внаслідок чого помітно порушуються фази газорозподілу, оскільки скорочується час відкриття клапанів, крім того, різко збільшується зношування кулачків. Тому методом шліфування кулачки розподільного валу рекомендується відновлювати тільки один раз. Виміряють кулачки по висоті, якщо цей розмір виходить за межі допустимого, їх наплавляють і обробляють під нормальний розмір.

Наплавляють кулачки автоматичним наплавленням в середовищі вуглекислого газу за допомогою спеціального копіювального пристосування з охолодженням валу в процесі наплавлення, а також ручним електродуговим наплавленням або газовою зваркою. При ручному наплавленні електродуги або газової на бічні сторони кулачків встановлюють захисні екрани з міді або графіту. Розподільчий вал поміщають у ванну заповнену водою та розміщують на призми або підставки таким чином, щоб половина діаметра валу знаходилась у воді. Наплавлення кулачків здійснюють у такій послідовності: 1, 7, 2, 5, 3, 6, 4 і 8.

Далі після наплавлення перевіряють вал на згин і при необхідності правлять. Потім наплавлені кулачки заздалегідь обробляють абразивним кругом за шаблоном і після цього остаточно здійснюють шліфування по копію під потрібний розмір і притупляють кромки.

Опорні шийки розподільчого вала шліфують під зменшений ремонтний розмір. В даному випадку в блок необхідно розмістити втулки ремонтного розміру. Хромування або остальювання використовують при збільшенні невеликих шарів. Великі шари наносять автоматичною наплавкою в середовищі вуглекислого газу, вібродуговим або плазмовим наплавленням такими ж матеріалами, як при наплавленні кулачків. Перед наплавленням масляні канали захищають графітними вставками, а перед хромуванням і залізненням — свинцевими і ін.

Прошліфовують шийки на кругло-шліфувальних верстатах типу ЗБ151. Спочатку перед шліфуванням під необхідний ремонтний розмір зенкують масляні отвори і заглиблюють масляні канали. Далі наплавлені шийки пришліфовують у два етапи. При грубому шліфуванні застосовують грубозернисті шліфувальні круги і залишають припуск 0,2 мм на діаметр для чистого шліфування. При необхідності після грубого шліфування проводять поверхневе гартування на глибину 2...4 мм, потім здійснюють чистове шліфування під необхідний розмір, зачищають задирки на торцях шийок далі притупляють і проводять полірування країв масляних каналів.

Зношену шестерню відновлюють залізненням або наплавленням і обробкою під номінальний розмір. Шпоночну канавку фрезерують під

збільшений розмір або наплавляють зношені краї електродами типу Э42 і фрезерують під номінальний розмір. Зміщення шпоночної канавки щодо діаметральної площини допускається не більш 0,01) мм, а биття поверхні шийки не більше 0,04 мм

Спрацьовану різьбу наплавляють і нарізують нову номінального розміру або проточують і нарізують зменшеного розміру з виготовленням нової гайки.

Відновлений розподільний вал повинен відповідати наступним вимогам: твердість поверхні кулачків і опорних шийок HRC 54...62, шорсткість не нижче за 8-й клас, овальність і конусність опорних шийок не більше 0,01 мм.

### **3.6. Технологічний процес лазерного наплавлення відновлюваних деталей**

Результати проведених досліджень дозволяють запропонувати наступну технологію відновлення відповідальних деталей сільськогосподарської техніки лазерним наплавленням, включаючи ряд операцій по миттю, дефектації деталей.

Принципова схема технологічного процесу відновлення деталі лазерним наплавленням представлена на рис. 3.9.

Лазерне наплавлення виконується двома способами. Перший спосіб передбачає нанесення шлікерного порошку-обмазки, подальшої сушки і оплавлення. Даний спосіб найбільш прийнятний для відновлення місцевого зносу, локальних дефектів площею до 1...3-10\*м<sup>2</sup>, при потужностях лазерного випромінювання 0,9... 1,2 кВт.

Другий спосіб застосовується у вигляді вдування порошкових сумішей в зону лазерного променя. Для реалізації цього способу застосовуються розроблені одно- і двох позиційні живильники. Їх технічні дані: довжина регульованого факела 15... 130 мм, маса 0,85 кг. Робота живильників дозволяє отримати як однорідні, так і комбіновані по складу покриття і відрізняються плавним регулюванням і рівномірністю подачі порошку, низькою витратою газу і зручністю монтажу. Витрата газу - стислого повітря - в оптимальному режимі - 0,027...0,059 м/год. Витрата порошку може складати до 1,5 кг/год при коефіцієнті використання порошку 0,5. Даний спосіб лазерного наплавлення – газопорошковий (ГПЛН) – доцільно використовувати для відновлення поверхонь із значним зносом більшої площі, наприклад, кулачки розподільних валів, валів паливних насосів. Для реалізації способу ГПЛН доцільно застосовувати потужності лазерного випромінювання - 1,0...3,0 кВт.

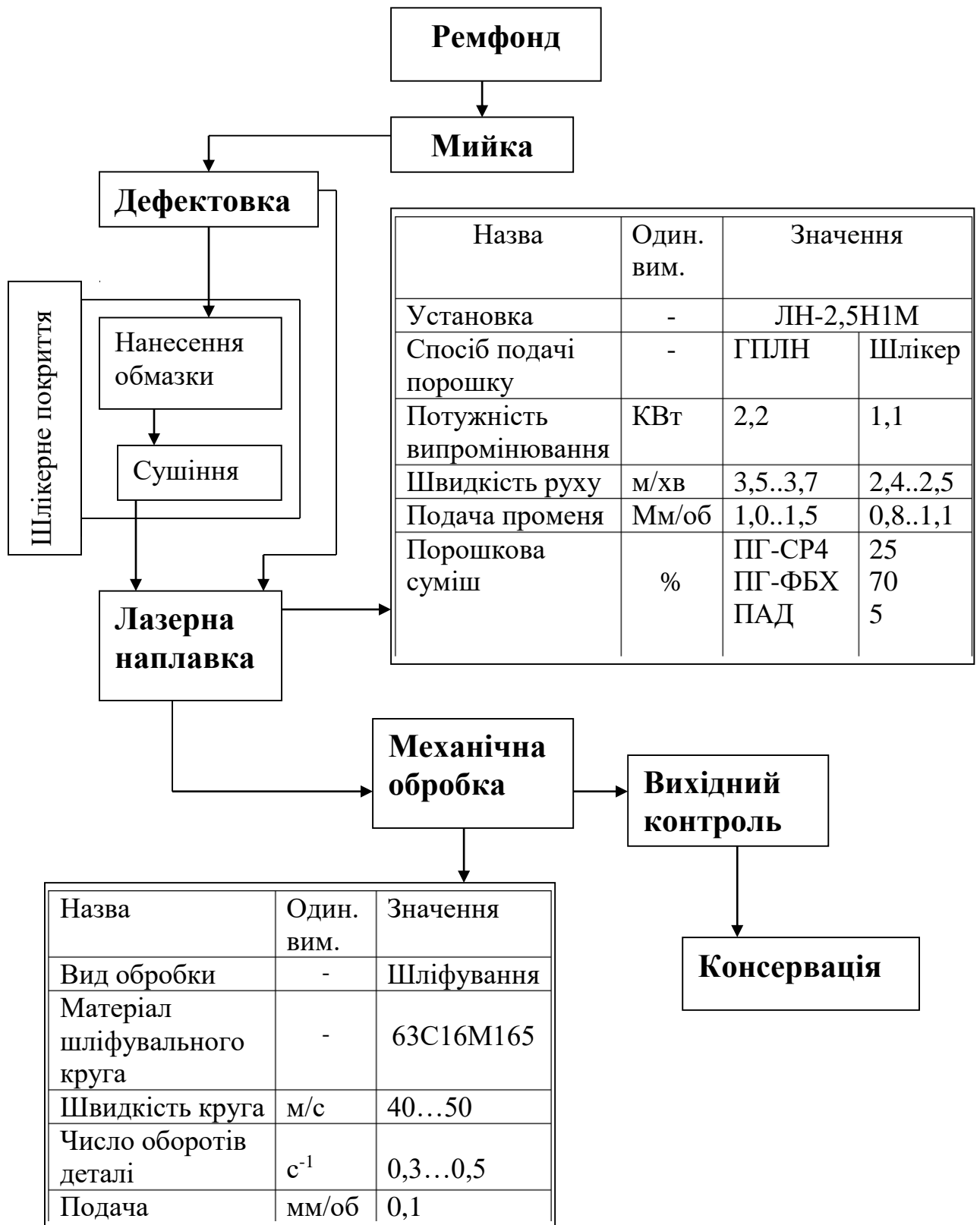


Рисунок 3.9. – Схема технологічного процесу лазерної наплавки

Оптимальні режими лазерного наплавлення відновлюваних деталей подані в табл. 3.2. Механічна обробка наплавлених шарів здійснюється для надання поверхні необхідного профілю і необхідних характеристик чистоти. Обробка наплавлених покриттів проводиться шліфуванням через високу твердість. Шліфування наплавлених шарів з використанням

порошкових сумішей на залізній основі виконується шліфувальним кругом з чорного карбіду кремнію, який забезпечує продуктивність в 2...4 рази вище, ніж електрокорунд. Рекомендуються застосовували наступні режими шліфування наплавлених деталей:  $V_{кр}=40..50$  м/;  $n_{дет}=0,3...0,5$  с<sup>-1</sup>,  $S=0,1$  мм/об.

Таблиця 3.2. - Оптимальні режими лазерного наплавлення відновлюваних деталей

Назва елементів технології	Од.вим	Значення	
		1	2
1. Лазерна установка	-	ЛН-2.5Н1М	
2. Спосіб подачі порошку		Вдування порошку в зону лазерного випромінюванн	Шлікерна обмазка
3. Потужність	-	2,0...2,2	1,0... 1,1
4. Швидкість наплавлення	м/хв	3,5...3,7	2,4...2,5
5. Подача лазерного	мм/об	1,0...1,5	0,8. ..1,1
6. Діаметр лазерного	м	5...8-Ю <sup>м3</sup>	4...6 10 <sup>3</sup>
7. Склад порошкової суміші	%	ПГ-СР4 ПГ ФБХ-6-2 ПАД	25 70 5

### Висновки по розділу 3.

В даному розділі обґрунтовано оптимальні параметри, що впливають на процес наплавлення, визначено оцінку температурних полів при лазерній обробці та наведено результати аналізу процесу подачі частинок порошкової суміші в зону лазерного наплавлення. Вибрано і обґрунтовано номенклатуру деталей сільськогосподарських машин для лазерного наплавлення та підібрано матеріали і склад сумішей. Наведено технологічний процес лазерного наплавлення відновлюваних деталей.

## ВИСНОВКИ

В роботі проведено огляд і аналіз в області використання лазерної обробки. Серед групи технологічних методів наплавлень лазерне напавлення має високу перспективність застосування при відновленні деталей сільськогосподарської техніки з складними і важкодоступними поверхнями, з невеликим і місцевим зносом, працюючими в умовах динамічних навантажень і великих контактних напружень. Лазерне напавлення застосовується у виробництві, як самостійна операція напавлення сплавів, що самофлюсуються, на нікелевій основі, так і допоміжна операція поліпшення напилених порошкових покриттів оплавленням.

Проведено аналіз теоретичних передумов взаємодії лазерного випромінювання з порошковими сумішами, впливом на матеріал основи деталі.

А також були висвітлені основні властивості поверхонь отриманих лазерним напавленням порошковими сумішами. Обґрунтовано оптимальні параметри технологічного процесу напавлення.

У роботі розроблено технологічний процес лазерного напавлення розподільчого вала двигуна СМД – 60, а також висвітлені його дефекти і способи їх усунення. Наведено перелік деталей сільськогосподарської техніки, що підлягають відновленню лазерним напавленням.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Левитский И. С. Технология ремонта машин и оборудования. - М.: Высшая школа. - 1991. - 319 с.
2. Гладкий П. В. Плазменная наплавка / П. В. Гладкий, Е. Ф. Переплетчиков, И. А. Рябцев. – К. : Екотехнологія, 2007. – 292 с.
3. Архипов В. Е., Биргер Е. М. Применение лазерной техники и технологи при ремонте оборудования. - М: Машиностроение. - 1990. - 63 с.
4. Коваленко В. С. Лазерная обработка материалов: возможности и перспективы. // Порошковая металлургия. - 1993. - № 5. - С. 14 – 18.
5. Лазерная и электронно—лучевая обработка материалов: Справочник. / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
6. Сафонов А. Н. Технология и оборудование лазерной термообработки и иаплавлении. – М.: МВТУ, 1986. – 38 с.
7. Григорьянц А. Ц., Сафонов А. Н., Тарасенко В. М. и др. Упрочнение поверхности сплавов лазерным излучением. // Поверхность,- физика, химия, механика.- 1983.-№ 9,-С. 124 – 123.
8. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров; под ред. А Г. Григорьянца. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
9. Григорьянц А.Г. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении : учеб. пособие / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров, Р. С. Третьяков; под ред. А. Г. Григорьянца. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018.
10. Лазерна поверхнева обробка матеріалів / Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. Харків : ФОП Панов А.М., 2020. 100 с.
11. Афанасьєва О. В., Дощечкіна І. В., Лалазарова Н. О., Ситников П. А. Дослідження впливу імпульсного лазерного гартування на властивості вуглецевих сталей. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доповідей ХХVІ міжнародної науково- практичної конференції MicroCad-2018 : у 4 ч. Харків : НТУ "ХП", 2018. С. 266-267.
12. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О. Технологія лазерного кольорового маркування сталей. Вісник ХНАДУ. 2020. Вип. 88. С. 137-142.
13. Губенко С.І. Особливості швидкісного плавлення та твердіння неметалевих включень при лазерній обробці сталі. / Губенко С.І., Беспалько В.М., Нікульченко І.О. // Металознавство та обробка металів. – 2017. - №2 (87). - С. 54 - 59.
14. Елохин В. А., Жданов И. Г. Методы модуляции излучения CO<sub>2</sub> - лазером. Научное приборостроение. 2003. Т. 13. № 3. С. 46–51.

15. Савченко О. М., Дробот М. В. Дослідження впливу параметрів випромінювання CO<sub>2</sub> - лазера на процес лазерної обробки поліграфічної продукції. Квалілогія книги. 2020. № 1 (37). С. 54–61.
16. Савченко О. М. Аналітичні дослідження сфери використання лазерних технологій. Квалілогія книги. 2019. № 1 (35). С. 76–83.
17. Бледнова Ж.М., Чаевский М.И, Будревич Д.Г., Степаненко М.А. Использование порошков никелида титана для получения поверхностных слоев, обеспечивающих функциональные свойства деталей // Новые перспективные материалы и технологии их получения: Сб. науч. тр. Международ. конф. - Волгоград: ВГТУ, 2004. -Т .1 .- С.170-171.
18. Реди. Д. Ж. Промышленное применение лазеров / под ред. И. М. Андреева. – М.: МИР, 1991. – 365 с.
19. Подчерняева И.А., Шаповал Т.А., Циганенко В.С. Формирование и свойства лазерных покрытий на основе оксинитридной керамики. // Порошковая металлургия. - 1992. — № 12. — С. 29—33.
20. Панченко В. Я., Голубев В. С., Васильцов В. В. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. М. : Физматлит, 2009. 663 с.
21. Мачехін Ю. П., Гнатенко О. С. Лазерні, оптико-електронні прилади та системи. Ч. 2. Параметри лазерного випромінювання. Харків «Факт», 2021. 145 с.
22. Gnatenko A. S., Machechin Y. P., Vasko K. O. Providing control of the polarization inside the resonator fiber ring laser // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. Київ. 2015. Вип. 1(23). С. 20 – 23.
23. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л. : Машиностроение, 1978. 335 с.
24. <http://vsegost.com/Catalog/20/20267.shtml>