Херсонський навчально-науковий інститут

Національного університету кораблебудування

імені адмірала Макарова

Кафедра зварювання

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри
_____к.т.н., доц. М.В. Матвієнко
«____» _____2025_року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Розробка технології відновлення деталей ДВЗ методом плазмового напилення

Виконав: студент VI курсу, групи 6121м спеціальності 132 Матеріалознавство за освітньо-професійною програмою Інжині-ринг зварювання та споріднених процесів

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

____Стефурак Давид Павлович_____

(прізвище та ініціали)

Керівник _Спіхтаренко Володимир Володимирович

(прізвище та ініціали)

Рецензент _Матвієнко Максим Валентинович_

(прізвище та ініціали)

Миколаїв - 2025 р.

Херсонський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова

Факультет суднобудівний
Кафедра зварювання
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»
(шифр і назва)
Спеціалізація Інжиніринг зварювання та споріднених процесів
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми
_____ к.т.н. доц. М.В. Матвієнко
"____" _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

студенту **Стефурак Давиду Павловичу**
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка технології відновлення деталей ДВЗ методом плазмового напилення
керівник роботи Спіхтаренко Володимир Володимирович, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені розпорядженням ХННІ НУК від "17" жовтня 2025 року № 20
2. Строк подання студентом проекту 13 грудня 2025р.
3. Вихідні дані до проекту Креслення виробу, матеріал сталь 40Х,

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). 1) Провести аналіз конструкції, матеріалу та методи відновлення деталей; 2) провести вибір матеріалів та режимів плазмового напилення; 3) провести аналіз та вибір обладнання для напилення; 4) провести дослідження по міцності зчеплення, зносостійкість зразків; 5) провести розробку технологічного процесу відновлення.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1) Загальний вигляд виробу. 2) Провести вибір методу відновлення. 3) Вибір матеріалів для наплавлення та хімічний склад і механічні властивості сталі. 4) Провести розрахунок ККД плазмотрону та термічного циклу ЗТВ. 5) Схема технологічного процесу відновлення поверхні деталей. 6) Вибір обладнання для відновлення. 7) Висновки по роботі.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	доц. Спіхтаренко В.В.		
2	доц. Спіхтаренко В.В.		
3	доц. Спіхтаренко В.В.		
4	доц. Спіхтаренко В.В.		

7. Дата видачі завдання **17.10.2025**

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз конструкції, матеріалу та методи відновлен-		
	ня циліндричних деталей	10.10.2025	
2	Розробка технологічного процесу напилення	30.10.2025	
3	Дослідження властивостей плазмових покриттів	20.11.2025	
4	Загальні висновки по дипломній роботі	01.12.2025	
	Графічна частина	14.12.2025	

Студент _____ **Стефурак Д.П.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____ **Спіхтаренко В.В.**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Анотація.

У роботі розглянуто технологію відновлення зношених деталей типу вал методом плазмового напилення самофлюсуючими порошками системи Ni–Cr–B–Si. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ресурсу робочих поверхонь деталей, що зношуються при збереженні достатнього рівня їхньої втомної міцності.

Метою роботи є вибір оптимального порошкового матеріалу та визначення раціональної технології нанесення й оплавлення покриттів, а також оцінювання їхніх механічних властивостей. Вибрано спосіб плазмового напилення з одночасним оплавленням на установці УПУ-3Д з плазмотроном ПП-25. Як матеріал застосовано порошок ПГ-10Н-01, що забезпечив найвищу міцність зчеплення серед досліджених зразків.

Проведено розрахунок ККД плазмотрона ($\eta \approx 0{,}5$) та визначено необхідну теплову потужність (10–12 кВт). На основі аналізу термічного циклу встановлено оптимальні режими попереднього підігріву (200–300 °C), що дозволяють мінімізувати утворення мартенситної структури та запобігти появі холодних тріщин. Розроблено технологічні рекомендації щодо нанесення та оплавлення покриття, включаючи параметри нагріву та відстані до поверхні.

Механічні випробування підтвердили високу якість покриттів, достатню міцність зчеплення та підвищену зносостійкість, що корелює з їхньою твердістю. Запропоновано методи контролю поверхні для виявлення дефектів.

Результати роботи свідчать про ефективність застосування самофлюсуючих сплавів Ni–Cr–B–Si у технологіях відновлення деталей та дозволяють рекомендувати розроблену методику для виробничого впровадження.

Ключові слова. Відновлення, плазмове напилення, самофлюсуючий сплав, оплавлення покриття, зносостійкість, міцність зчеплення.

Annotation

The study examines a technology for restoring worn shaft-type components using plasma spraying with self-fluxing Ni–Cr–B–Si alloy powders. The relevance of the re-

search is driven by the need to extend the service life of functional surfaces that undergo wear while preserving sufficient fatigue strength of the base material.

The objective of the work is to select an optimal powder material and determine the most efficient technology for coating deposition and subsequent remelting, as well as to evaluate the mechanical properties of the produced coatings. Plasma spraying with simultaneous remelting was selected, performed using the UPU-3D system equipped with a PP-25 plasma torch. The РГ-10Н-01 powder was chosen as the coating material due to its superior adhesion strength among the tested samples.

Calculations of the plasma torch efficiency ($\eta \approx 0.5$) and the required thermal power (10–12 kW) were performed. Based on thermal cycle analysis, optimal preheating parameters (200–300 °C) were established to minimize the formation of martensitic structures and prevent cold cracking. Technological recommendations for coating deposition and remelting were developed, including heating conditions and stand-off distances.

Mechanical testing confirmed the high quality of the coatings, demonstrating sufficient adhesion strength and increased wear resistance, correlating with coating hardness. Surface inspection methods for detecting external defects were also proposed.

The results indicate the effectiveness of self-fluxing Ni–Cr–B–Si alloys for restoring machine components and support the applicability of the developed methodology for industrial implementation.

Keywords: restoration, plasma spraying, self-fluxing alloy, coating remelting, wear resistance, adhesion strength.

ЗМІСТ

Вступ 8
1. Аналіз конструкції, матеріалу та методи відновлення деталей ... 9
1.1 Причини утворення несправностей 10
1.1.1 Аналіз умов експлуатації деталей машин та механізмів ... 11
1.1.2 Види зношування деталей машин та механізмів 12
1.2 Конструкція та її призначення 14
1.3 Характеристика основного металу 16
1.4 Аналіз методів відновлення деталей 17
1.4.1 Газополуменеве напилення 19
1.4.2 Надзвукове газоповітряне (газокисневе) напилення 22
1.4.3 Плазмовий метод напилення 24
1.5 Цілі та задачі дипломної роботи 29
2 Розробка технологічного процесу напилення 31
2.1 Аналіз матеріалу для плазмового наплавлення 32
2.2 Наплавні сплави, що самофлюсуються. 33
2.2.1 Вплив легуючих елементів на властивості 34
2.2.2 Вибір порошкових сплавів для дослідження 35
2.3 Вибір устаткування для плазмового напилення 38
2.4 Розрахунок режимів відновлення 43
2.4.1 Розрахунок ККД плазмотрону 43
2.4.2 Розрахунок потужності плазмотрону 45
2.5 Вибір режиму плазмового напилення з урахуванням термічного циклу 47
2.5.1 Розрахунок термічного циклу напилення 47
2.5.2 Розрахунок очікуваних структур після напилення 52
2.6 Технологія та техніка процесу напилення 56
2.7 Розробка техпроцесу відновлення валів 60
2.8 Контроль якості нанесених покриттів 62
3 Дослідження властивостей плазмових покриттів 64

3.1 Визначення міцності зчеплення покриття з основою 65
3.2 Визначення твердості покриття..... 71
3.3 Дослідження зносостійкості антифрикційних матеріалів..... 72
3.3.1 Вибір методики випробування 74
3.3.2 Проведення випробування на зносостійкість 76
4 Загальні висновки по дипломній роботі..... 79
Перелік літератури..... 82
Додатки 84

ВСТУП

Запорукою ефективного використання різноманітних машин та обладнання є високий рівень їх технічного обслуговування та своєчасного ремонту. Можливість використання сучасних технологій для відновлення вже відпрацьованих деталей, а також для збільшення терміну служби наявних деталей машин і механізмів дозволяє значно підвищити техніко-економічні показники існуючих виробничих технологічних процесів.

Технології відновлення та підвищення терміну служби деталей машин і механізмів здатні забезпечити економію високоякісних та дорогих матеріалів, палива, енергетичних та трудових ресурсів; на високому рівні підтримувати рівень охорони навколишнього середовища. Для відновлення працездатності зношених деталей потрібно у кілька разів менше технологічних операцій. Слід виділити той факт, що використання сучасних відновлювальних технологічних операцій дозволяє багаторазово відновлювати початкові розміри та експлуатаційні властивості деталей; важливим моментом є можливість надання деталям нових властивостей, що позитивно відбивається на терміні служби відновлюваного обладнання.

Технологічні процеси відновлення деталей з використанням джерел високотемпературного нагріву, такі як наплавлення і напилення, займають провідне місце при ремонті виробів, з їх допомогою відновлюють понад 80% всіх деталей.

Багаторічними дослідженнями встановлене, що з деталей, що надходять у ремонт зношуються несучі поверхні й зберігаються значний ресурс по параметру втомленій міцності. Нанесення втраченого металу на несучі поверхні з наступної механічною обробкою дозволяє багаторазово використовувати деталь. Одним з таких видів виробництва запасних частин є відновлення зношених деталей за допомогою газотермічного наплавлення порошкових матеріалів.

					МР 132.6121м.07.01.04. ПЗ		
Змін.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дата			
Студент		Стефурак Д.П.			1 Аналіз конструкції, матеріалу та методи відновлення деталей	Літ.	Арк. 9 / Аркушів 22
Консультант							
Керівник		Спіхтаренко В.				ХННІ НУК	
Н. Контр.							
Зав.кафедр.		Матвієнко М.В.					

1.1 Причини утворення несправностей

Утворення та розвиток несправностей у деталях машин і механізмів пояснюється дією об'єктивно існуючих закономірностей. Несправності з'являються внаслідок постійного чи раптового зниження фізико-механічних властивостей матеріалу деталей (старіння), їх стирання, деформування, зминання, корозії, перерозподілу залишкових напружень та інших причин, що викликають руйнування деталей (втома).

У більшості випадків відбуваються зміни в сполученнях - порушення заданих зазорів у рухомих з'єднаннях або натягів у нерухомих. Практично будь-яка несправність є наслідком зміни складу, структури чи механічних властивостей матеріалу, конструктивних розмірів деталей та стану їх поверхонь.

Поява несправностей зумовлена конструктивними, технологічними та експлуатаційними факторами.

До конструктивних факторів відносяться розрахункові навантаження, швидкості відносного переміщення, тиску, матеріали, їх фізико-механічні характеристики і структура, конструктивне виконання деталей і складальних одиниць, форма і величина зазорів або натягів в сполученнях, макрогеометрія, шорсткість і твердість поверхонь, умови.

Технологічними факторами є прийоми, способи, точність та стабільність одержання заготовок, види механічної, термічної, зміцнювальної та фінішної обробки при виготовленні деталей, правильність складання, регулювання, припрацювання та випробування вузлів, агрегатів та машин.

Експлуатаційні фактори надають вирішальний вплив на збереження властивостей елементів машин, що забезпечуються їх конструкцією та технологією виготовлення. До експлуатаційних належать фактори: що визначаються призначенням машин, її навантажувальними та швидкісними режимами, а також інтенсивністю експлуатації; і які залежать від призначення ма-

шини (умови експлуатації, своєчасність і повнота технічного обслуговування та інших.).

1.1.1 Аналіз умов експлуатації деталей машин та механізмів

При раціональному конструктивному оформленні та грамотному технологічному процесі виготовлення термін служби деталей машин та механізмів насамперед залежить від умов їх експлуатації та зносостійкості матеріалу, з якого ці деталі виготовлені. Тому для обґрунтованого вибору або розробки матеріалів, створення комп'ютерних систем проектування деталей машин і механізмів, методів і технологій відновлення деталей, що зношуються, в першу чергу необхідний ретельний аналіз умов роботи таких деталей і видів зношування, яким вони піддаються.

Насамперед необхідно визначити вид або види тертя, в умовах якого працює дана деталь. Розрізняють тертя кочення, тертя кочення з прослизанням, тертя ковзання, тертя без мастила, тертя з мастилом, тертя без абразивного прошарку, тертя з абразивним прошарком.

Важливе значення мають характеристики контртіла, в контакті з яким працює деталь. У якості контртіла можуть бути різні метали, незакріплений абразив, напівзакріплений абразив або закріплений абразив, газ (потік газу), газ з абразивом (потік газу з абразивом), рідина (потік рідини), рідина з абразивом (потік рідини з абразивом), водяна пара.

Наступні характеристики умов експлуатації деталей - тиск у контакті досліджуваної деталі з контртілом і навантаження, яким піддаються деталі. Діапазони тисків в контакті рекомендують вибирати наступними МПа: менше 50; 50 – 150; 150 – 300; 300 – 500; понад 500 МПа. Розрізняють постійні та змінні навантаження. Деталі можуть експлуатуватись з ударними навантаженнями різної інтенсивності: без ударів; із ударами малої інтенсивності; із ударами середньої інтенсивності; із ударами високої інтенсивності.

Середовище, в якому експлуатується деталь, може бути активним або пасивним. Діапазони температур для середовища, °С: нижче -10; -10 – +150; 150 - 400; 400 - 600; 600 - 750; вище за 750°С. Діапазони тиску для середовища, МПа: 0,1 (атмосферний); 0,1 - 5; 5 – 15; 15 – 50; понад 50.

1.1.2 Види зношування деталей машин та механізмів

Під зношуванням розуміють процес відділення матеріалу з поверхні деталі і (або) збільшення його залишкової деформації при терті, що проявляється в постійній зміні розмірів деталі. Знос - це результат зношування, що визначається в умовних одиницях.

Зносостійкість - властивість матеріалу чинити опір зношування в певних умовах тертя. Її оцінюють величиною, зворотною швидкістю або інтенсивністю зношування.

Зношування пари деталей у процесі тривалої експлуатації можна характеризувати трьома періодами (рисунок):

-1-й період – період опрацювання або початкового зносу;

-2-й період – період зносу, що встановився;

-3-й період – період аварійного (посиленого) зношування.

За певних умов зношування один із зазначених періодів може не проявитися.

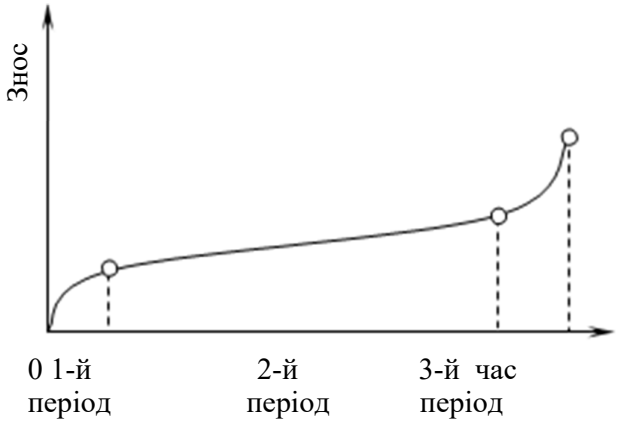


Рисунок 1.1 Крива зносу

У початковий момент у період приробітку через малу фактичну площу торкання деталей, що мають великі макро- і мікронерівності поверхні, в місцях контакту двох деталей розвиваються високі питомі тиску і внаслідок цього інтенсивність зношування деталей зазвичай велика. Потім відбувається зміна мікро- та макрогеометрії поверхонь, збільшується площа фактичного контакту і відповідно зменшується питомий тиск у точках контакту, що сприяє зменшенню зношування. Тривалість опрацювання визначають умови навантаження і стан поверхневих шарів контактуючих деталей.

У період приробітку деталі слід експлуатувати при знижених режимах, так як значне нагрівання на нечисленних ділянках фактичного контакту може призвести до схоплювання поверхонь, що контактують. У процесі приробітку інтенсивність зношування поступово знижується, досягаючи приблизно постійної для даних умов експлуатації величини, - починається період зносу.

У цей період інтенсивність зношування залишається приблизно постійною, і деталі при оптимальних режимах можуть працювати досить довго.

Аварійний знос виникає, якщо в процесі експлуатації різко погіршуються умови роботи деталі - значно збільшуються зазори, порушується режим мастила, виникають додаткові динамічні навантаження і т.п. Інтенсивність зношування у разі різко зростає.

Взаємодія двох тертьових поверхонь може бути механічним і молекулярним. Механічне взаємодія виявляється у взаємному впровадженні та зачепленні нерівностей поверхонь, а також у їх судженні у разі ковзання грубих поверхонь. Молекулярна взаємодія проявляється у вигляді адгезії та схоплювання. При цьому схоплювання властиве лише металевим поверхням. Адгезія і схоплювання можуть викликати вирви матеріалу поверхонь, що труться. Крім того, в зазор між поверхнями, що труться, може потрапляти окалина та інші абразивні частинки, що прискорює процес зношування.

Руйнування поверхонь тертя відбувається у вигляді окремих елементарних процесів, поєднання яких залежить від матеріалів та умов тертя.

У більшості окремих елементарних процесів руйнування поверхонь тертя лежать втомні процеси. Зношування поверхні відбувається в результаті підсумовування різних за інтенсивністю та видами елементарних актів руйнування та зміни механічних та фізико-хімічних властивостей матеріалу під впливом зовнішніх факторів (середовище, температура, тиск, тертя та ін.). Сукупність явищ у процесі тертя визначає вид зношування та його інтенсивність.

Існують різні підходи до класифікації видів зношування, але для практики відновлювальних робіт проблема всеосяжної класифікації видів зношування найчастіше немає вирішального значення.

1.2 Конструкція та її призначення

Паливний насос високого тиску дозує паливо відповідно до режимів роботи двигуна й забезпечить його подачу в визначені моменти робочого циклу до форсунок.

У сучасних швидкохідних двигунах використовуються паливні насоси плунжерного типу (рис. 1.2.), Основними робочими деталями яких є плунжер 1 і гільза 2, що утворюють плунжерну пару.

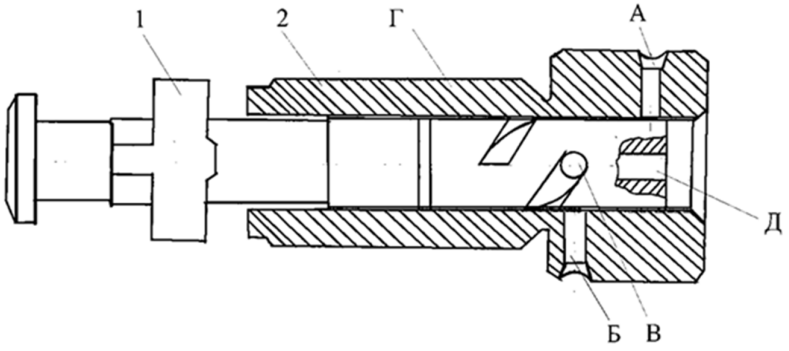


Рисунок 1.2 Плунжерна пара паливного насосу

Плунжерна пара складається з двох елементів, кожен з яких призначений для виконання чітко визначених функцій:

1. Плунжер. Виготовляється як металевого циліндра, довжина якого значно перевищує діаметр. Основне призначення деталі – зворотно-поступальний рух усередині втулки.

2. Втулка. Також виготовляється з високоміцного металу у вигляді порожнистого циліндра. Усередині деталі розташовуються отвори (А, Б, В, Г і Д), призначені для подачі або відведення палива (для ТНВД дизельного двигуна) або інших робочих рідин (для звичайного насоса та різних гідромашин).

Ключова вимога до плунжерної пари полягає у забезпеченні герметичності вузла при одночасному вільному переміщенні плунжера всередині поршня. Для вирішення задачі при виготовленні деталей потрібно ретельно дотримуватись геометричних розмірів, а на додаток до цього поверхні обох елементів ретельно обробляються, завдяки чому досягається щільність примикання один до одного. Стандартним вважається зазор між поршнем і втулкою 1-3 мкм. Сказане пояснює, чому плунжерну пару нерідко називають прецизійною, що буквально означає високоточна.

Експлуатація вузла, що розглядається, супроводжується високим тиском і серйозним рівнем супутніх навантажень. Тому, крім герметичності, до плунжерної пари пред'являються серйозні вимоги в частині міцності та стійкості до різних фізичних впливів. Як наслідок – для виготовлення вузла застосовуються високоміцні та зносостійкі марки сталі та сучасне обладнання, здатне забезпечити потрібний ступінь точності геометричних розмірів деталей та необхідні технології обробки металу. Довговічність та надійність плунжерної пари є одним із ключових факторів, завдяки яким забезпечуються вражаючі характеристики дизельного двигуна в цілому.

1.3 Характеристика основного металу

Втулка й плунжер паливного насоса виготовляються зі сталі ШХ15, ХВГС або 40Х, з наступною термічною обробкою для додання необхідної твердості з наступною обробкою їх глибоким холодом для стабілізації мікроструктури. Допускається виготовлення плунжерних пар зі сталі 25Х5МА з наступним азотуванням.

Найбільшу небезпеку при зварюванні сталей зі змістом вуглецю більше 0,3% становить утворення гартівних структур, причому при тім же змісті вуглецю чутливість сталі до утворення тріщини і гартівних структур (мартенситу) тим вище, чим більше в сталі зміст легуючих елементів (таблиця 1.1 та таблиця 1.2).

Таблиця 1.1 Хімічний склад сталі

Марка сталі	Зміст елементів, %			
	C	Cr	Mn	Si
ШХ15	0,95…0,50	1,04…1,67	0,20…0,40	0,17…0,37
40Х	0,34…0,44	0,80…1,10	0,50…0,80	0,17…0,37

Таблиця 1.2 Механічні властивості сталі

Марка сталі	$\sigma_в$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ_5 %	Ψ %	$a_н$ МДж/м^2
40Х	1000	800	10	45	0,6

ШХ 15 – хромиста сталь із високим вмістом вуглецю й хрому. Така сталь використовується для виготовлення поршневих кілець, кульок і роликів шарикопідшипників.

40Х - сталь ставиться до легованих сталей із сумарною кількістю легуючих елементів більше 2,5 %. Як правило, ці сталі, характеризуються високою міцністю, у тому числі при підвищених температурах, зносостійкістю, задовільно обробляються різанням і тиском.

При виході плунжерної пари з ладу її заміняють новою парою. Ступінь впливу окремих елементів різна й може бути оцінена по різних ознаках, од-

ним із яких є еквівалент по вуглецю. Найпоширеніша формула для підрахунку еквівалента по вуглецю (1.1) [1].

$$C_{екв} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{10} = 0{,}81 \qquad (1.1)$$

$$C_{екв} = 0{,}44 + \frac{0{,}8}{6} + \frac{0{,}37}{24} + \frac{1{,}1}{5} = 0{,}81\%$$

Еквівалент по вуглецю C_e = 0,81% більше припустимого еквівалента Ce=0,45%, із цього можна зробити висновок, що при зварюванні (напилюванні) сталь 40Х схильна до утворення тріщин і тому потрібна спеціальна технологія для усунення цього небажаного явища. Ці заходи в основному зводяться до наступних операцій:

- створення термічного циклу напилювання, що усуває утворення гартівних структур (попередній або супутній підігрів);

- зниження змісту водню в металі зони нагрівання (поліпшення захисту напилюваного металу, ретельна підготовка напилюваної поверхні й напилюємих порошків перед нанесенням);

- термічна обробка виробу безпосередньо після напилювання;

- застосування технологічних прийомів, що знижують залишкові напруги (застосування пристосувань стиску, що створюють напругу, і т.п.).

У цей час не існує методу відновлення зношених поверхонь плунжерної пари й задачею даної роботи є розробка технологічного процесу відновлення плунжерної пари паливного насоса ДВЗ.

1.4 Аналіз методів відновлення деталей

У цей час авторитетні підприємства країн використовують більш 30 методів відновлення поверхонь деталей машин. Найбільш прогресивні з них є методи, які дозволяють відновлювати не тільки форму й геометричні розміри поверхонь деталей, але й надавати їм потрібні фізико-механічні властивості.

Перевагу відновлення деталей машин у порівнянні з виготовленням нових стає більш очевидним, якщо врахувати скорочення часу технологічного циклу.

Широке поширення для відновлення набувають методи газотермічного напилення покриттів.

Структура напилених покриттів складається з шаруватих елементів, сформованих при високошвидкісному ударі про холодну поверхню та подальшому затвердінні частинок (рис. 1.3).

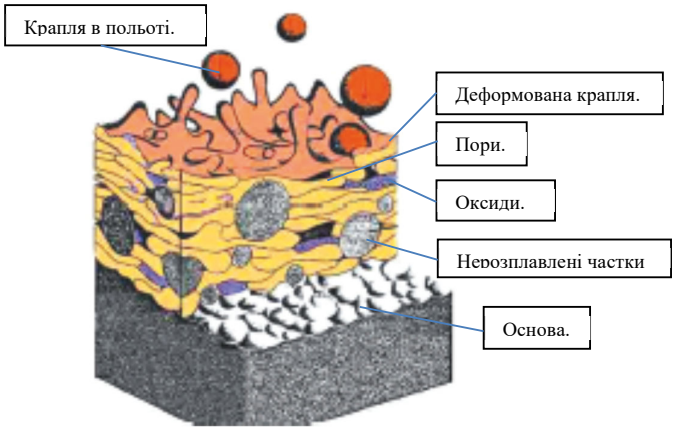


Рисунок 1.3 Схема формирования ГТН покрытия.

Розплавлені або розігріті до пластичного стану частинки розплескуються по поверхні, зачіпляючись попередньо по її нерівностях і потім контактуючи між собою. На дистанції напилення відбувається окислення частинок, і оксидна плівка, що утворюється, потрапляє в покриття. Вона має сильний вплив на властивості покриття: може перешкоджати дифузії частинок, впливати на міцність зчеплення, твердість покриття. Внаслідок малого розміру або низької швидкості окремі частинки встигають охолонути до моменту удару про підкладку нижче точки плавлення, а їх кінетичної енергії недостатньо для деформування. Це призводить до того, що вони залишаються покриті в глобулярній формі. В інтервалі між нанесенням окремих шарів на поверхні останнього шару відбувається адсорбція газів і відкладення пилоподібних фракцій матеріалу, що розпилюється, або його оксидів. Крім того, через

високу швидкість розтікання та кристалізації частинок при ударі в зоні контакту з поверхнею раніше нанесених частинок залишаються порожнини та дефекти. Це призводить до появи мікропорожнечі на стиках частинок, а оскільки покриття формується в атмосфері, мікропустоти наповнюються газом. Частина перегрітих вище точки плавлення частинок може випаровуватись і осаджуватися у паровій фазі.

1.4.1 Газополуменеве напилення

В умовах розвитку техніки та інтенсифікації технологічних процесів зростає роль поверхні матеріалів, оскільки руйнівні процеси (знос, втома, корозія), що визначають працездатність виробів, відбуваються у поверхневому шарі. Ефективним засобом підвищення довговічності та надійності різних деталей інструментів є формування на їх поверхні високоміцних, зносо- та корозійностійких покриттів.

Металеве покриття як спосіб обробки поверхні характеризується різноманітністю методів і широким спектром застосування. За джерелом енергії для впливу на матеріал, що розпилюється, напилення ділиться на: електричне, по теплоті згоряння рідкого/газоподібного палива, кінетичне під дією газу високого тиску без його згоряння, випромінювання.

Серед технологій ресурсозбереження інтенсивно розвивається метод газополум'яного напилення покриттів, яке дозволяє отримувати дорого стоять легуючі шари з високою якістю на поверхні недорогих сталей з низькою якістю, тим самим знижуючи вартість матеріалу і покращуючи такі властивості, як опір зносу, корозійно-стійкість, жаростійкість. Простота управління газовим полум'ям, можливість плавної зміни в широких межах температури (а отже, і енергії), короткочасність термічного впливу на матеріал і малі зони впливу цього впливу – ось ті основні переваги, які все більше привертають увагу до цього методу.

Газополум'яне напилення є одним із способів нанесення захисних покриттів. Сутність цього процесу полягає у перенесенні захисного матеріалу (дроту або порошку) на поверхню деталі в струмені газового полум'я за допомогою газу, що транспортує. У цьому процесі використовується тепло, що виділяється при згорянні горючих газів (ацетилену, пропану, водню, метану) у суміші з киснем або стисненим повітрям (рисунок 1.4).

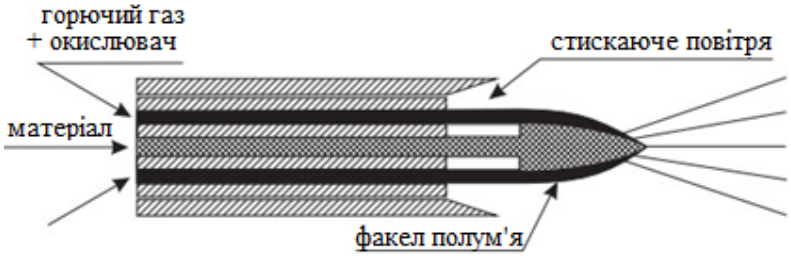


Рисунок 1.4 Схема процесу газополум'яного напилення

Дана схема з використанням порошку реалізована в пальнику (рисунок 1.5). Найбільш ефективно застосування порошкових ГП-пальників для напилення самофлюсних матеріалів.

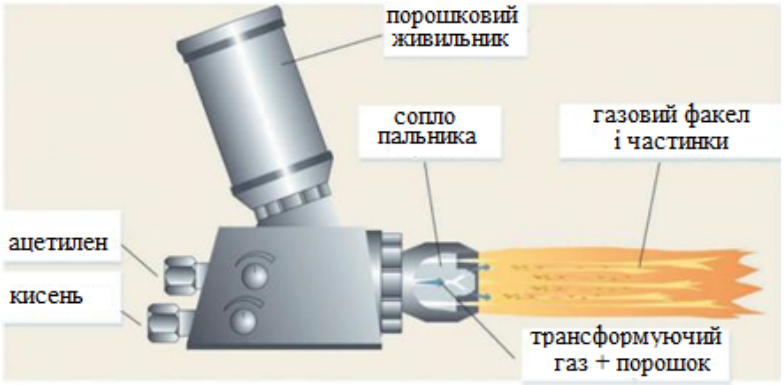


Рисунок 1.5 Схема пальника для газополум'яного порошкового напилення

На властивості покриттів, одержуваних газополум'яним напиленням, впливають багато чинників, пов'язані з характеристиками розпилювального пристрою, вихідного матеріалу, параметрів руху частинок по дистанції напилення та їх взаємодії. Високі енергетичні характеристики (рисунок 1.6) пото-

ків енергії дозволяють сформувати надзвичайно дрібнодисперсний структурно-фазовий стан поверхневого шару, що має підвищені фізико-механічні, фізико-хімічні властивості. Це покращує триботехнічні властивості поверхні, які знижують практично всі види зносу – абразивний, адгезійний, кавітаційний, ерозійний та ін. – та значно підвищує теплофізичні властивості поверхні – теплостійкість та жароміцність, а також корозійну стійкість тощо.

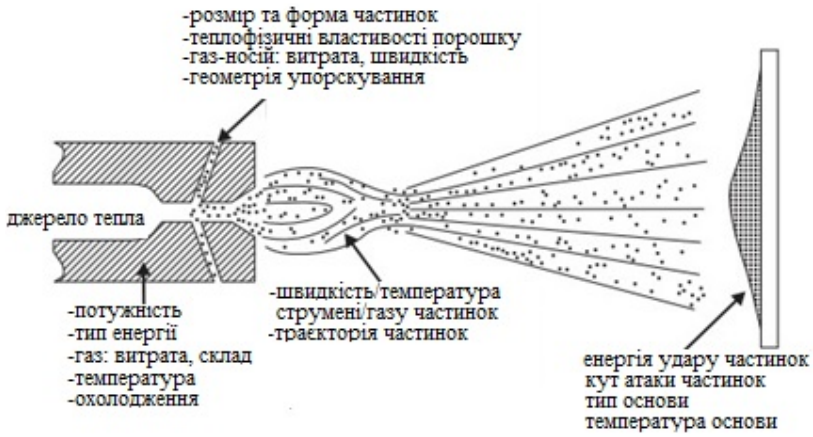


Рисунок 1.6 Основні чинники, що впливають властивості покриттів

Створення постійних значень цих параметрів є змістом розробки технології нанесення покриттів. Залежно від технології термічного напилення та напилюваного матеріалу в покритті в різній кількості присутні пори, мікротріщини, частинки, які не повністю розплавилися або рекристалізовувалися перед ударом об поверхню, і продукти реакції між матеріалом частинок та атмосферними газами. Інтенсивний тепловий вплив на матеріал термічного напилення який у поєднанні із взаємодією частинок у польоті з атмосферою викликає хімічні зміни у складі та структурі покриття термічного напилення, тобто:

– селективне випаровування легуючих елементів;

- зміна фазового складу металевих компонентів, наприклад, зміни в твердих фазах у присутності кисню;

- освіта стабільних оксидів, нітридів з активних металів.

Ці сполуки, з одного боку, збільшують інтегральну твердість поверхні, що веде до підвищення зносостійкості. З іншого боку - знижують міцність з'єднання окремих шарів покриття [2].

З точки зору збереження вихідного хімічного складу матеріалу покриттів, газополум'яний спосіб має низку переваг перед іншими методами напилення.

1.4.2 Надзвукове газоповітряне (газокисневе) напилення

HVOF (високошвидкісний киснево-окислювальний процес). HVOF — система термічного напилення, що використовує згорання газів, таких як водень, або рідке паливо, наприклад, гас.

Установка Intelli-Jet фірми UniqueCoat Technologies (США) (рисунок 1.7) призначена для нанесення покриттів методом надзвукового газоповітря напилення.

Рисунок 1.7 Установка Intelli-Jet фірми UniqueCoat Technologies

У камері згорання НГН – пальника (рисунок 1.8) спалюється суміш стислого повітря і горючого газу (пропан, пропілен, МАФ), і через неї аксіально подається розпиляємий порошок. У струмені частки розпиляного мате-

ріалу розганяються до 800 м/с, нагріваючись при цьому нижче за точку плавлення.

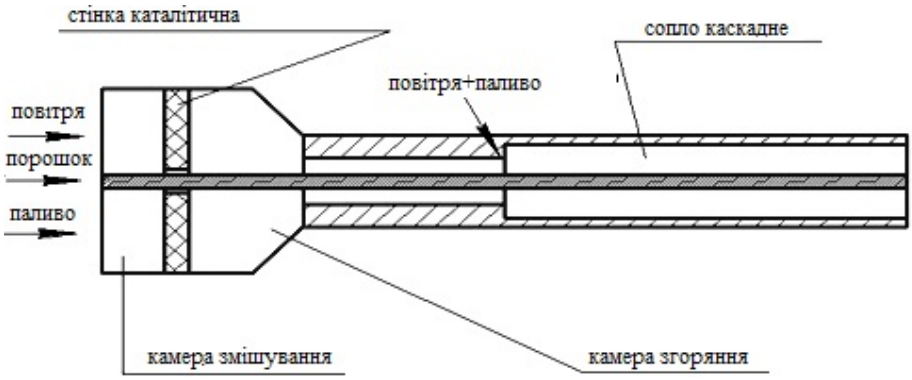


Рисунок 1.8 Схематичне зображення пальника надзвукового газоповітряного (газокисневого) напилення (HVOF)

Для зниження енергетичних втрат високошвидкісний струмінь продуктів згорання додатково підігрівається продуктами згорання вторинної суміші "повітря - горючий газ" в каскадному соплі. Стисле повітря використовується також для охолоджування теплонагружених елементів.

Покриття відрізняються практично без пористою структурою, низьким вмістом кисню (~ 0,2 %), високою, до 150 МПа, адгезійною міцністю. Залежно від матеріалу, можуть витримувати теплові навантаження до 1100 °С, дії агресивних середовищ і протистояти зношенню.

Наприклад, в покриття на основі карбідів зносостійкість в кілька разів вище, чим в загартованої інструментальної сталі (HRC 62-65) і електролітичного хрому. По продуктивності СГВ - напилення у декілька разів перевершує процеси напилення аналогічної якості (HVOF, детонаційне, плазмове), при цьому сумарні витрати по нанесенню покриття нижче в 2 - 2,5 рази.

У ЗАТ НПП "Машпром" в технологічному процесі ГТН використовується робот (рисунок 1.9). Це забезпечує стабільну якість продукції, гарантовану повторюваність параметрів і високу культуру виробництва.

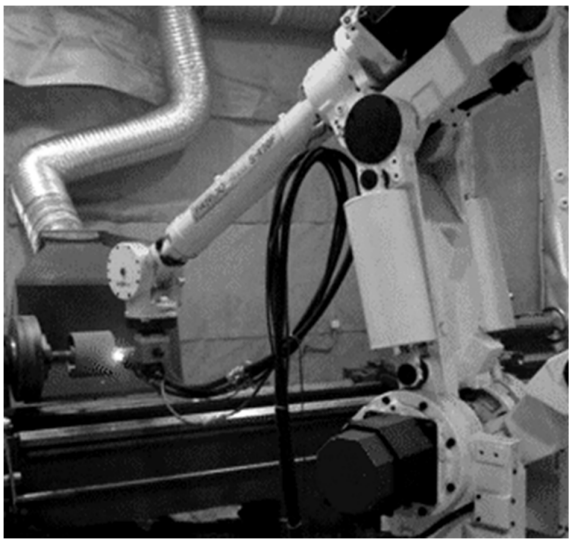


Рисунок 1.9 Використання роботу маніпулятору.

1.4.3 Плазмовий метод напилення

У сучасній інженерії поверхонь, де вимоги до довговічності, зносостійкості та функціональності деталей постійно зростають, плазмове напилення займає лідируючі позиції. Цей метод є одним із найбільш універсальних та технологічних у групі процесів газотермічного напилення. Його суть полягає у використанні концентрованої енергії плазмового струменя для нагрівання, плавлення і високошвидкісного перенесення напилюваного матеріалу на поверхню, що захищається. Ця технологія дозволяє створювати на поверхні деталей функціональні шари з унікальними властивостями, які неможливо отримати іншими способами.

Фізичні основи та технологічні можливості процесу. Ключовим елементом процесу є плазмотрон - пристрій, в якому генерується плазмовий струмінь. Усередині плазмотрона запалюється електричний дуговий розряд, який проходить через потік інертного або молекулярного газу (плазмоутворювального). За рахунок стиснення дуги спеціальним соплом відбувається інтенсивне нагрівання газу, його іонізація та перетворення на плазму з екст-

ремально високою температурою - від 10 000 до 15 000 К. Для порівняння, це в 2-3 рази вище температури на поверхні Сонця.

Різке термічне розширення газу в сопловому апараті плазмотрона перетворює його теплову енергію в кінетичну, формуючи плазмовий струмінь зі швидкістю, що досягає, а іноді і перевищує швидкість звуку (понад 340 м/с).

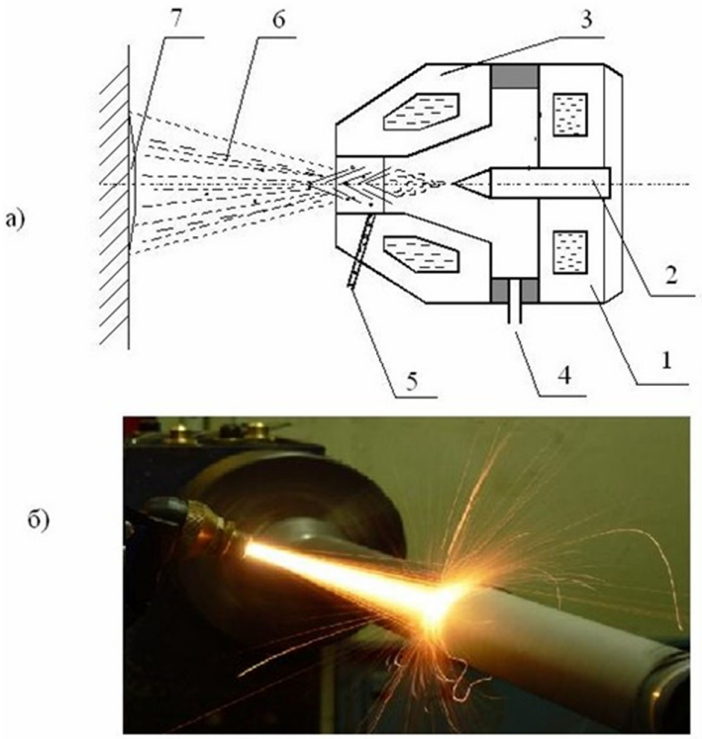


Рисунок 1.10 Схема (а) та реальний процес (б) плазмово-порошкового напилення: 1 – корпус плазмотрону; 2 – катод (вольфрамовий електрод); 3 - анод (охолоджуване сопло); 4 – канал подачі плазмо утворюючого газу; 5 – інжектор для подачі порошку; 6 – плазмовий струмінь з частинками матеріалу; 7 - підкладка (напилювана поверхня).

Саме поєднання надвисоких температур і швидкостей дозволяє ефективно плавити та напилювати покриття з практично будь-яких відомих матеріалів:

- метали та сплави: від алюмінію та міді до молібдену та вольфраму;

- керамічні матеріали: тугоплавкі оксиди (Al_2O_3, ZrO_2, TiO_2), карбіди (WC, TiC), бориди та нітриди;

- композиційні та металокерамічні матеріали (кермети): наприклад, суміші карбіду вольфраму з кобальтом (WC-Co) для створення надміцних зносостійких покриттів.

Як плазмоутворюючі гази найчастіше застосовують аргон (Ar) і азот (N_2), а також їх суміші з воднем (H_2) або гелієм (He) для збільшення тепломістку та ефективності струменя. Гнучке управління процесом - підбір складу і витрати газів, налаштування параметрів дуги, зміна геометрії сопла - дозволяє прецизійно регулювати енергетичні параметри струменя під конкретний матеріал, що напилюється, і необхідні властивості покриття.

Механізм формування покриття та адгезійна міцність. Процес формування покриття – це складний комплекс фізико-хімічних явищ. Частинки порошку, введені в плазмовий струмінь, прискорюються до швидкостей 100-150 м/с і вище, перебуваючи в розплавленому або в'язко-текучому стані. При зіткненні із попередньо підготовленою поверхнею основи (підкладки) відбувається миттєва (за 10^{-8}-10^{-9} с) зупинка, що супроводжується виникненням імпульсного тиску до 1500 Па. Під впливом цього тиску розплавлена частка деформується, розтікаючись поверхнею і утворюючи тонкий диск.

На атомарному рівні взаємодія частки з основою відбувається у кілька етапів. При зближенні з відривом ~10^{-9} м виникають сили молекулярного взаємодії (сили Ван-дер-Ваальса). При ще більшому зближенні до ~10^{-10} м, що досягається за рахунок високої кінетичної енергії та тиску, формуються міцні хімічні та металеві зв'язки. Сукупність цих зв'язків, а також механічне зачеплення за мікро нерівності підкладки, забезпечують високу адгезійну міцність плазмових покриттів, особливо при нанесенні тугоплавкої кераміки на метали.

Ключовою перевагою методу є те, що при всій потужності плазмового струменя, загальний нагрів деталі залишається незначним — як правило, не

вище 100–200°C. Це досягається за рахунок короткочасності контакту та можливості керування дистанцією напилення. Таке низьке нагрівання виключає короблення, деформації та небажані структурні зміни в металі основи, що особливо важливо для термооброблених та великогабаритних деталей.

Ключові переваги плазмового напилення. У порівнянні з альтернативними методами, такими як газополум'яне, електродугове, детонаційне напилення або традиційні процеси наплавлення, плазмова технологія має цілу низку незаперечних переваг:

- **універсальність**: Можливість напилювати практично будь-які матеріали, включаючи найтугоплавкіші, на підкладки з будь-яких конструкційних матеріалів;

- **висока якість покриттів**: Досягається висока щільність, низька пористість (менше 5-10% для стандартних режимів) та міцність зчеплення з основою (до 60-80 МПа та вище), що регламентується та контролюється згідно з ГОСТ 9.304-87 «Покриття газотермічні. Загальні вимоги та методи контролю»;

- **висока продуктивність**: Швидкість нанесення матеріалу значно перевершує багато інших методів;

- **ефективність використання матеріалу**: Коефіцієнт використання порошку сягає 85%, що знижує собівартість процесу;

- **відсутність термічних деформацій**: Низьке нагрівання основи дозволяє обробляти тонкостінні, точні та великогабаритні вироби без ризику зміни їхньої геометрії;

- **гнучкість і керованість**: Широкі можливості регулювання параметрів процесу для отримання покриттів із заданими властивостями (наприклад, з регульованою пористістю для роботи в умовах мастила);

- **мінімальні припуски**: Точність нанесення дозволяє залишати мінімальні припуски на подальшу механічну обробку;

- **можливості формоутворення**: Технологія може використовуватися не тільки для покриттів, але і для створення цілих деталей складної форми (наприклад, тиглів, сопел) шляхом напилення матеріалу на оправку, що видаляється;

- **автоматизація**: Процес легко піддається автоматизації та роботизації для серійного виробництва та обробки складних поверхонь.

Області застосування: від автопрому до аерокосмосу. Завдяки своїй універсальності, плазмове напилення знайшло найширше застосування для відновлення та зміцнення деталей у різних галузях промисловості. В автомобілебудуванні методом плазмового напилення відновлюють та зміцнюють колінчасті та розподільні вали, осі, втулки, посадкові місця підшипників, клапани, гальмівні барабани та багато іншого.

Однак його застосування цим не обмежується. Критично важливі області включають:

- **авіація та космонавтика**: Нанесення теплозахисних бар'єрних покриттів (ТЗП) на лопатки газових турбін із діоксиду цирконію (ZrO_2), що дозволяє значно підвищити робочу температуру двигуна та його ККД;

- **медицина**: Нанесення біосумісних покриттів із гідроксіапатиту на титанові імплантати для прискорення їхньої інтеграції з кістковою тканиною.

- **енергетика та нафтогазова галузь**: Захист від зносу та корозії деталей насосів, запірної арматури, екранів парових котлів.

Серед різних наплавних матеріалів, при плазмовому напиленні, особливе місце займають зносостійкі матеріали, що мають високу твердість і зберігають її при високих температурах у процесі роботи.

У процесі відновлення автомобільних деталей активно можуть застосовуватися самофлюсуючі порошкові сплави на основі хромонікелевих сплавів. Найбільш поширені порошкові сплави наступних марок: ПГ-12Н-01, ПГ-12Н-02, ПГ-10Н-01.

Зносостійкі покриття з порошкових сплавів системи Ni – Cr – B – Si , отримані методом плазмового напилення з подальшим оплавленням, мають досить складну структуру, що складається з твердого розчину на основі нікелю, багатокомпонентної евтектики, боридів, карбідів та силіцидів [3].

1.5 Цілі та задачі дипломної роботи

Попередній аналіз літературних джерел показав, що розвитку досліджень щодо використання методів газотермічного напилення для зміцнення та відновлення робочих поверхонь деталей машин і механізмів приділяється значна увага як за кордоном, так і в нашій країні. Окреслилися певні тенденції застосування цих методів у машинобудуванні, суднобудуванні та судноремонті. Наявні істотні успіхи у виробництві та ремонті ДВЗ і дизельних агрегатів.

Як напилювані матеріали широкого поширення набули багатокомпонентні порошки на основі карбідів, силіцидів та оксидів; переважно це карбід хрому, дисульфід молібдену, оксид алюмінію. Також широко застосовуються порівняно дорогі самофлюсівні (самофлюсуючі) порошки на основі кобальту, нікелю та хрому. Вони містять елементи, що покращують змочуваність та забезпечують самофлюсування рідкого металу. Для цього здійснюють нагрівання покриття разом із деталлю до високих температур, близько 1000°С.

Для успішної реалізації можливостей газотермічного напилення поряд зі створенням надійного високопродуктивного обладнання необхідно розробляти нові ефективні матеріали для напилення та методи гнучкого керування властивостями покриттів.

У переважній більшості випадків відмова в роботі двигунів та іншої техніки зумовлена зношуванням важконавантажених деталей і вузлів. При цьому руйнується лише робоча поверхня деталей. Практичне застосування прогресивних методів зміцнення й відновлення таких деталей є важливою народногосподарською проблемою.

Виходячи з технічних умов на відновлення деталей типу вал, можна дійти висновку, що найбільш прийнятним і перспективним методом відновлення валів є метод плазмового напилення. Плазмове напилення дає змогу отримати рівномірне покриття без вираженої гребінчастості, що, своєю чергою, дозволяє зменшити витрату напилюваного матеріалу порівняно з дуговими методами наплавлення.

Використовуючи плазму — високотемпературне джерело нагріву — можна наносити покриття практично з усіх тугоплавких матеріалів, які в плазмовому струмені не сублімують і не зазнають інтенсивного розкладання.

Метою даної роботи є вибір матеріалу з числа самофлюсівних сплавів на основі Ni–Cr–B–Si, а також визначення способу оплавлення покриття (з одночасним або подальшим оплавленням). Необхідно порівняти механічні властивості отриманих покриттів і розробити технологію відновлення поверхонь деталей.

Для досягнення поставлених цілей необхідно вирішити такі завдання:

- обґрунтувати можливість підвищення ресурсу напилених покриттів;

- розробити технологічний процес відновлення робочих поверхонь;

- вивчити принципи вибору складу порошків для напилення зносостійких покриттів;

- перевірити можливість застосування порошків для напилення покриттів;

- провести випробування отриманих покрить на механічні властивості. Провести вибір напиляємого матеріалу;

- розробити методи контролю отриманих покриттів.

					МР 132.6121м. 07.02.04. ПЗ		
Змін.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дата			
Студент		Стефурак Д.П..			2 Розробка технологічного процесу напилення	Літ.	Арк. 31 / Аркушів 33
Консультант							
Керівник		Спіхтаренко В.				ХННІ НУК	
Н. Контр.							
Зав.кафедр.		Матвієнко М.В.					

Протягом останніх десятиліть різними науковими групами в різних країнах активно ведеться розробка наплавних сплавів, що самофлюсуються [4, 5], що володіють підвищеною зносостійкістю, корозійною стійкістю і стійкістю до окислення в повітряному середовищі при високих температурах і призначених для відновлення і ремонту зношених деталей різної форми методом газо.

Деталі машин та механізмів експлуатуються в різних умовах та піддаються різним видам зношування. З цієї причини для їх відновлення та зміцнення використовують наплавні сплави різних складів. Завдяки високим службовим характеристикам (міцності, пластичності, корозійної стійкості в більшості робочих середовищ) і технологічності, наплавні сплави, що самофлюсуються, знаходять широке застосування практично у всіх областях машинобудівної галузі [6].

Наплавні сплави широко застосовуються для ремонту та зміцнення деталей машин та механізмів з використанням методів термічного напилення. У ці сплави вводяться різні легуючі елементи для вдосконалення фізичних, хімічних, механічних та самофлюсних властивостей.

2.1 Аналіз матеріалу для плазмового наплавлення

Для газотермічного покриття сталевих деталей використовуються спеціальні порошкові зносостійкі сплави. Розроблені сплави з твердістю від 35 до 55 HRC, такі як ПГ-10Н-01, ПГ-10Н-04, ПГ-12Н-01, ПГ-12Н-02 та ПГ-12Н-3 для надання різної твердості поверхні наплавлення. Твердість покриття може бути забезпечена одразу після обробки поверхні без необхідності подальшої термообробки. Всі ці сплави розроблені на основі кобальту, нікелю та міді з різними карбідоутворюючими добавками, які забезпечують необхідні фізико-механічні властивості для наплавленого (нанесеного) покриття. Температура плавлення наплавлених порошкових сплавів становить 970-1100 °С.

Покриття на робочих поверхнях механічних деталей традиційно виготовляються з конструкційної сталі з прошарком із спеціальних сплавів, більш зносостійких, ніж основний матеріал деталей, та знайшли широке застосування у різних галузях машинобудування. Такі покриття одержують різними способами, що зменшують плавлення металу покриття. Як матеріал покриття процес його нанесення називається наплавкою.

Поверхнево-зміцнюючи покриття можуть використовуватися для підвищення зносостійкості деталей, що працюють у нормальних, високотемпературних та агресивних середовищах. Згідно з практичним досвідом, що підтверджує загальну спрямованість матеріалів на підвищення зносостійкості зі збільшенням твердості, така обробка поверхні називається «твердою наплавкою».

Успішна реалізація методу наплавлення можлива лише при раціональному виборі наплавних матеріалів, які мають відрізнятися високою зносостійкістю, технологічністю при наплавленні.

2.2 Наплавні сплави, що самофлюсуються.

Порошки, що самофлюсуються, мають низьку температуру плавлення, що знижує термічний вплив на деталь при об'ємній наплавці, значно знижуючи рівень залишкових деформацій і напруг в основі. Високі технічні властивості цього виду порошкового матеріалу проявляються також у його здатності розчиняти оксидні плівки на поверхні основного металу та добре його змочувати. Самофлюсування відбувається при обробці поверхні в результаті легування B та Si. При високих температурах утворюється скло шлакове покриття, що оберігає метал поверхні від взаємодії з атмосферним киснем та азотом. Тому для дослідження таких порошкових матеріалів немає необхідності спеціально захищати ванну розплаву від несприятливого впливу навколишнього середовища [7].

Використання порошків сплавів, що самофлюсуються, для формування покриттів підвищує зносостійкість, теплостійкість, корозійну та ерозійну стійкість поряд з високою технологічністю. При цьому покриття, сформовані наплавкою з підвищеною швидкістю охолодження, мають кращі міцності і трибологічними властивостями (підвищеною зносостійкістю і зниженим коефіцієнтом тертя) порівняно з покриттями, сформованими плазмовим [8, 9] і газополум'яним [3] способами.

Завдяки зазначеним вище характеристикам хімічного складу і фазового складу покриття на основі сплавів, що самофлюсуються, широко застосовуються в різних галузях промисловості як для ремонту зношених деталей, так і для поліпшення якості поверхні нових виробів, що піддаються в умовах експлуатації високим контактним навантаженням, температурам і агресивним впливам.

2.2.1 Вплив легуючих елементів на властивості

Однією з характеристик Ni є його вплив на коефіцієнт лінійного розширення. Коефіцієнт лінійного розширення швидко зменшується зі збільшенням вмісту Ni у сплаві, досягаючи мінімального значення при 36% Ni, а потім знову збільшуючись. Таким чином, варіюючи вміст Ni, можна отримувати сплави з різними коефіцієнтами лінійного розширення, що впливає якість наплавлення.

Бор – є легуючим елементом, вплив якого до кінця вивчено при багатокомпонентному легуванні. Разом з вуглецем, хромом та іншими карбідоутворюючими елементами **B** дає різноманітні сполуки у вигляді боридів та боридів вуглецю. Введення невеликої кількості бору значно підвищує твердість та зносостійкість сплаву, але пластичність різко знижується, що призводить до утворення тріщин у наплавленні. Бор має флюсуючі властивості і знижує температуру плавлення сплаву.

Як приклад на рисунку 2.1 представлена мікрофотографія наплавочного сплаву Ni-16%, Cr-4.5%, Fe-3.5%, B-3.5%, Si-1% для газотермічного напилення, отриманого високотемпературним методом.

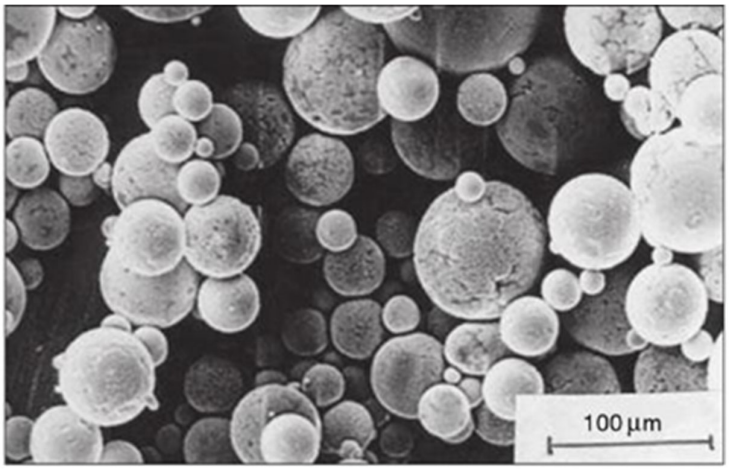


Рисунок 2.1 Електронна мікрофотографія (вторинні електрони) порошкового сплаву, що самофлюсується, Ni–16%, Cr–4.5%, Fe– 3.5%, B–3.5%, Si–1% для газотермічного напилення (збільшення ×240)

2.2.2 Вибір порошкових сплавів для дослідження

З великої кількості розроблених в даний час нікелевих сплавів найбільшого поширення для плазмової наплавки отримали порошки самофлюсованих Ni-Cr-Si-B-C-сплавів (табл. 2.1), відомих під назвою "Колмоної".

Торезький завод наплавочних твердих матеріалів Мінкольормету України освоїв за ліцензією фірми «Кастолін» (Швейцарія) серійне виготовлення металевих порошків, що призначені для зміцнення нових та відновлення зношених деталей машин методами газотермічного напилення. Завод виготовляє порошки гранульовані для порошкового наплавлення ПГ-10Н-01, ПГ-10Н-04, ПГ-10К-01; порошки гранульовані та високолеговану порошкову суміш (ПС). [11].

Для газотермічного напилення з наступним оплавленням ПГ-12Н-01, ПГ-12Н-02, ПС-12НВК-01; порошок гранульований та композиційні порош-

ки термореагуючі (ПТ) для газотермічного напилення без наступного оплавлення.

Хімічний склад порошків повинен відповідати нормам, зазначеним в табл.2.1 [12].

Таблиця 2.1 Хімічний склад гранульованих порошків

Марка порошку	Хімічні елементи, %					HRC (HRB)
	Cr	B	Si	Fe	C	
ПГ-10Н-01	14,0-20,0	2,8-4,2	4,0-4,5	3,0-7,0	0,8-1,0	55-62
ПГ-10Н-04	-	1,2-1,8	2,3-2,8	0,2-0,6	<0,1	(89-96)
ПГ-12Н-01	8,0-14,0	1,7-2,8	1,2-3,2	2,0-5,0	0,3-0,8	35-40
ПГ-12Н-02	10.0-16.0	2.0-4.0	3.0-5,0	3.0-5.0	0.4-0.8	45-50
ПГ-12Н-03	12.0-18.0	2.5-4.5	3.5-5.5	3.5-5.0	0.5-1.5	55-62

Порошки ПГ-12Н-01, ПГ-12Н-02, ПГ-10Н-01 складені на нікелевій основі системи Ni-Cr-B-Si-C-Fe. Твердість регулюється змістом, B, Cr. Напилені сполуки мають низький коефіцієнт тертя, високу припустиму робочу температуру (до 800°С); їх застосовують для напилення та напилення з оплавленням при відновленні деталей з вуглецевих, корозійностійких сталей, чавуну типу «вал», поршневих насосів, фасок клапанів, шийок колінчастих валів, штовхачів. При твердості до HRC 40 покриття обробляють різанням понад HRC 40 - шліфуванням.

Порошки ПГ-10Н-03, ПГ-10Н-04 системи Ni-B-Si низьковуглецеві, відсутність у їх складі хрому значно знижує їх твердість. Нанесені покриття мають високу корозійну стійкість, добре опираються ударним навантаженням. Їх застосовують для відновлення посадкових місць під підшипники, зубчастих коліс, кулачкових муфт, штампового інструменту. Покриття добре обробляються різанням.

Метал, наплавлений нікелевими самофлюсуючими. сплавами, має гарну зносостійкість при кімнатній і підвищених температурах, особливо в умо-

вах тертя металу по металу, жароміцністю та жаростійкістю. Він також стійкий проти корозії в розчинах деяких кислот (оцтової, мурашиної, лимонної тощо), в каустичній соді та інших агресивних середовищах.

Зі збільшенням вмісту вуглецю, бору та кремнію твердість наплавленого металу підвищується, а його структура змінюється від доевтектичної, що складається з α-твердого розчину на основі нікелю і складної евтектики, до заевтектичної, в якій поряд із цими структурними складовими є також борид хрому, складні карбіди та карбобориди.

Наплавлений метал з доевтектичної та евтектичної структурами краще для роботи в парах тертя і при значних ударних навантаженнях, із заевтектичною структурою – при абразивному зношуванні.

ПГ-12Н-01 (порошок-аналог 12493) – сфероідізований порошок сплаву Ni-Cr-B-Si-C-Fe. Наноситься на деталі з простих та нержавіючих сталей та чавунів. Нанесений шар добре протистоїть тертю металу об метал, має відмінний опір корозії та термічним ударам. Твердість шару HRC 45-50. Максимально допустима робоча температура 800^0C. Обробляється різанням. Застосовується для зміцнення та відновлення валів, поршнів насосів, ущільнюючих кілець апаратури високого тиску, деталей запірної арматури в гідроприводах та ін.

ПГ-10Н-01 (порошок – аналог «Боротак» -сфероідізований порошок сплаву на нікелевій основі системи Ni-Cr-B-Si-C-Fe. Наноситься на прості та нержавіючі сталі та чавуни. Сплав має відносно низьку температуру плавлення та підвищену текучість, що забезпечує отримання після нанесення досить гладкої поверхні. Нанесений шар характеризується дуже низьким коефіцієнтом тертя, високою зносостійкістю, добре зберігає свою твердість при високих температурах. Твердість шару HRC 55-62. Максимально допустима робоча температура 700^0C. Товщина покриття до 2 мм. Обробляється шліфуванням. Застосовується для зміцнення та відновлення інструменту, шийок

кулачкових валів, ексцентриків, храповиків, мішалок, ланцюгів транспортерів, кулачків та різних опір.

ПГ-10Н-04 (порошок-аналог 10680 «Хромотек») – сфероідізований порошок сплаву на нікелевій основі системи Ni- B-Si. Наноситься на деталі з простих та нержавіючих сталей та чавунів. Нанесений шар має хороший коефіцієнт тертя та опору ударам, не окислюється при високих температурах, забезпечує хорошу корозійну стійкість проти найбільш розповсюджених хімічних реагентів. Твердість шару НВ 230. Максимально допустима робоча температура 600^0С. Можливі покриття більшої товщини (до 8-10мм). Покриття легко обробляються різанням. Застосовується для зміцнення та відновлення штампового інструменту, зубчатих коліс, валів, кулачкових муфт, посадочних місць під підшипники кочення, сіделок клапанів, для обробки неправильно просвердлених або овальних отворів, відновлення деталей, забракованих після механічної обробки, нанесення проміжного шару перед наплавленням більш твердими порошками.

2.3 Вибір устаткування для плазмового напилення

У цей час створено велику кількість типів установок для плазмового напилення порошковими матеріалами, використовуваних у різних галузях промисловості. До основних відмітних ознак устаткування плазмового напилення можна віднести наступне:

- середовище, у якому провадиться напилення - на атмосфері, у вакуумі, у захисному газі, в окисному газі й т.п.;

- ступінь автоматизації - установки з ручним, напівавтоматичним, програмним автоматичним керуванням;

- число робочих позицій - однопозиційні й багато позиційні установки.

Найбільш поширені пристрої, це пристрої з одним катодом і одним анодом, і з введенням порошку зовні короткого сопла, перпендикулярно до осі полум'я.

Принцип дії таких пристроїв показано на схемі (рисунок 2.2):

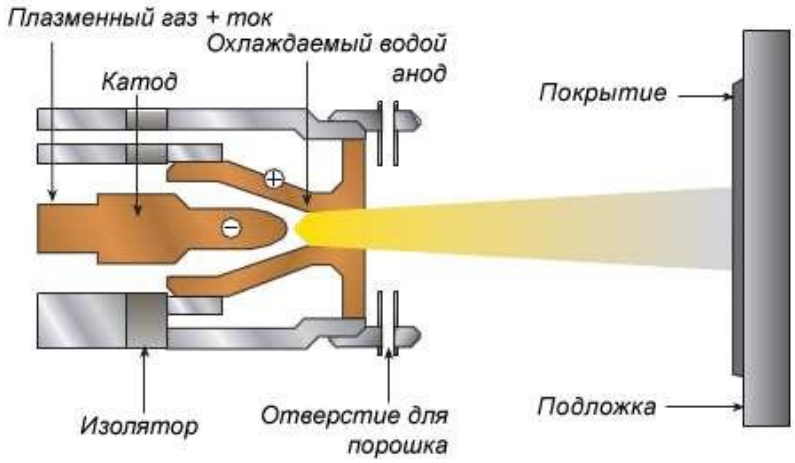


Рисунок 2.2 Принцип плазмового напилення.

Як видно зі схеми, коротке сопло плазматрона одночасно є анодом. Порошок вводиться зовні сопла перпендикулярно до осі полум'я, в безпосередній близькості від дуги.

Найпопулярніший пристрій цього типу - плазматрон 3MB фірми Sulzer Metco, який, з невеликими модифікаціями, існує вже більше 40 років. На рисунку 2.3 представлені актуальні моделі серії з максимальною потужністю 40 кВт.

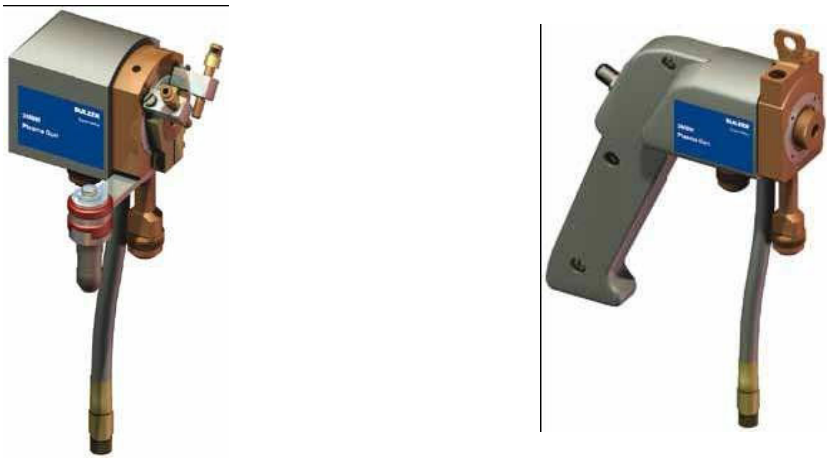


Рисунок 2.3 Плазматрон 3MB.

Традиційні однокатодні плазматрони інших фірм мало відрізняються від плазматронів Sulzer Metco: всі вони працюють при відносно малій витраті газів, низькій (< 100 В) напрузі і великому (до 1000 А) струмі дуги. Жоден із традиційних плазматронів не дозволяє досягти частинок швидкості звуку.

Перевагою плазматронів з невеликою витратою газів є можливість надання дуже високої температури (> 4000°С) через відносно довгий час їх перебування в гарячій зоні полум'я поруч із дугою. Такі високі температури частинок дозволяють розплавити практично будь-які керамічні та металеві матеріали.

Розвиток техніки плазмового напилення останні двадцять років йде шляхом збільшення швидкості частинок. Для надання часткам більшої швидкості необхідно збільшити тиск плазмоутворювальних газів перед соплом, що автоматично призводить до підвищення витрати газів та зростання напруги дуги.

Сучасне обладнання для плазмового напилення є комплексом, що складається з джерела живлення, системи управління, плазмотрону, порошкового дозатора та системи охолодження.

Комплекс на базі вітчизняної установки плазмового напилення типу УПУ- 3Д поставляється замовникові на єдиній переносній платформі. Включає все необхідне устаткування для нанесення будь-яких покриттів. Вага комплексу не більше 1200 кг, споживана потужність до 30 кВа. Має автономну систему по газо- і водопостачанню, що дозволяє, при відновленні унікальних великогабаритних деталей, перенести його до місця роботи або механічної обробки цих деталей.

Даний комплекс призначений для нанесення широкого спектру покриттів із порошкових матеріалів та є гарним прикладом промислової установки.

Рисунок 2.4 Комплекс плазмового напилення УПУ-3Д

До складу комплексу входять:

-безпосередньо установка УПУ-3Д із джерелом живлення ІСН 160/600;

-плазмотрони, наприклад, ПП-25, високопродуктивний ПП-6-01(рисунок 2.5а) або спеціалізований ПП-21 (рисунок 2.5б) для роботи у важкодоступних місцях;

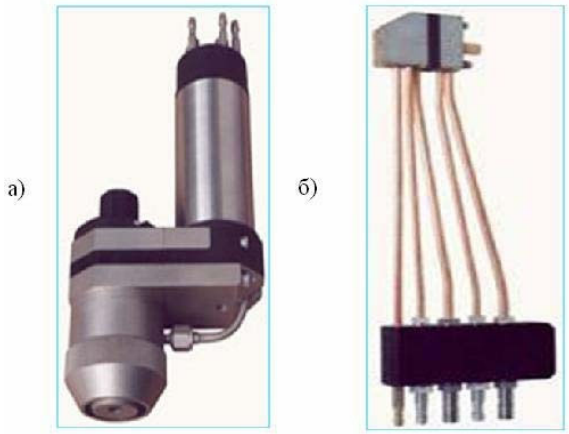


Рисунок 2.5 Плазмотрони для плазмово-порошкового напилення: а – високо-продуктивна модель ПП-6-01; б – модель ПП-21 для напилення внутрішніх та важкодоступних поверхонь.

-порошковий дозатор для точної та стабільної подачі матеріалу;

-газова рампа з балонами аргону та водню;

-автономна система водяного охолодження;

-допоміжне обладнання (редуктори, шланги, стійки).

Таблиця 2.2 Основні технічні характеристики комплексу УПУ-3Д

Найменування параметра	Значення
Габарити комплексу (ДхШхВ), мм	2500х1500х1700
Загальна маса комплексу, кг	1200
Товщина покриттів, що наносяться, мм	0,05…3,00
Міцність зчеплення покриття (адгезія), МПа	до 100
Розмір частинок порошку, що напилюється, мкм	40…160
Типи напилюваних матеріалів	Метали, сплави, кераміка, композити
Діапазон регулювання струму дуги, А	200...400 (плавне)
Діапазон робочої напруги, В	30…90
Макс. споживана потужність, кВА	30
Напруга мережі живлення, В	380 (3 фази)
Використовувані плазмоутворюючі гази	Аргон, суміш аргон + водень
Витрати газів, м³/год	0,9…1,5
Система охолодження автономна	водяна
Продуктивність по напиленню, кг/год	2…4

Для нанесення покриття обираємо плазмотрон ПП-25. Плазмотрон ПП-25 (рисунок 2.6) призначений для плазмово-порошкового напилення (наплавлення) різних деталей сплавами на основі Fe, Ni і Co в ручному режимі.

Рисунок 2.6 Плазмотрон ПП-25

Це дуже зручний інструмент для напилення (наплавлення) складних криволінійних поверхонь, а також в ремонтних цілях. Зокрема, ПП-25 може бути успішно застосований для напилення (наплавлення) шнеків екструдерів і т.п. Як робочий газ використовується чистий аргон (99.995 % Ar).

Технічні характеристики плазмотрона ПП-25 наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Технічні характеристики плазмотрона ПП-25

Струм непрямої дуги, А	20-50
Струм прямої дуги, А	30-150
Подача присадного порошку, кг/год	0,5-3,0
Фракція порошку, мкм	40-125
Втрати порошку %	< 5
Витрата робочого газу (аргон), л/хв.	12-15
Витрата води, що охолоджує, л/хв.	> 3
Діаметр х довжина, мм	41х98
Маса, кг	0,7

2.4 Розрахунок режимів відновлення

Для обраного обладнання здійснимо розрахунок ККД плазмотрона, визначимо максимальний розмір частинки, що розплавляється (фракції) і необхідну для цього потужність плазмотрона.

2.4.1 Розрахунок ККД плазмотрону

ККД плазмотрона (η) змінюється в залежності від витрати газу та струму дуги, від 0,1 до 0,8. Для малих витрат плазмоутворюючих газів, при ламінарній течії газу ККД плазмотрона низький (0,1...0,4). Якщо витрата газу становить понад 0,5 л/с ККД, дорівнює 0,5...0,8. Розрахунок провадиться за формулою:

$$\eta = 2{,}48 \cdot 10^{5} \cdot I^{-4} + 0{,}097 \cdot I^{0{,}25} \cdot \sigma^{-0{,}38} \text{ г/с}$$

де I – струм дуги, А;

σ – витрата газу, г/с.

Визначимо витрату газу. Для напилення необхідна витрата газу складає 10 л/хв. Необхідно перевести у г/с, це буде:

$$\sigma = \frac{10 \cdot A_{\mathrm{Ar}}}{60 \cdot 22{,}4}$$

де: A_{Ar} – вага моля Ar, A_{Ar} = 39,9г;

22,4 – об'єм одного моля, л

$$\sigma = 10 \cdot 39{,}9/60/22{,}4 = 0{,}3 \text{г/с}$$

Визначимо розрахункові величини (η) в залежності від току. Розрахункові дані зведемо у таблицю 2.4:

Таблиця 2.4 Визначення ККД плазмотрону

I, A / σ, г/с	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
200	0,673	0,577	0,517	0,475	0,443	0,418	0,397	0,380
250	0,711	0,610	0,546	0,502	0,468	0,442	0,420	0,402
300	0,744	0,638	0,572	0,525	0,490	0,462	0,439	0,420
350	0,773	0,663	0,594	0,546	0,509	0,480	0,457	0,437
400	0,800	0,685	0,614	0,565	0,527	0,497	0,472	0,452

По результатам розрахунку побудуємо залежність ККД від струму і витрат плазмо утворюючого газу

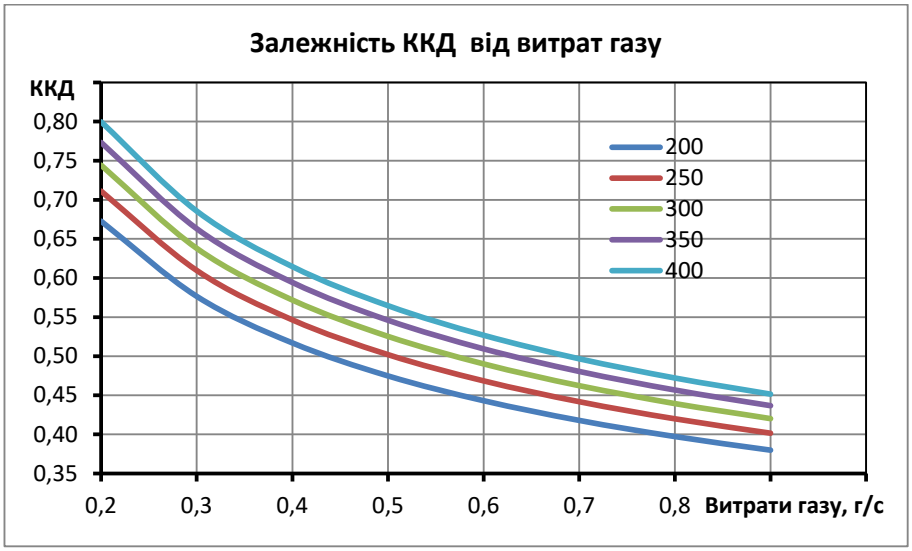


Рисунок 2.7 Визначення ККД плазмотрону

2.4.2 Розрахунок потужності плазмотрону

Для отримання якісного покриття необхідно, щоб частинки порошку в струменях плазми встигали повністю проплавитися. Для визначення умов оптимального проплавлення частинок порошку та максимального зростання товщини покриття (коефіцієнт осадження матеріалу) запропоновано спрощену модель поведінки конденсуючої частинки в плазмовому струмені, за допомогою якої легко встановити зв'язок між її газодинамічних параметрів і теплофізичними властивостями порошків. Цей зв'язок дозволяє визначити необхідну потужність розплавлення частинок порошку.

Величину теплової потужності плазмотрону, необхідної для розплавлення частинок матеріалу в струмені аргонової плазми, можна визначити за допомогою виразу:

$$P_e = 2{,}99 \frac{V_r^{1,5} \cdot d_r \cdot Д^{0,5}}{\eta \cdot R_0^{1,25} \cdot [l_k + 6(R_0 - R)]^{0,6}}$$

де: Vr - витрата плазмо утворюючого газу, Vr = 0,00017 м^3/с;

dr – діаметр частинки порошку, м;

Д - параметр тяжкості плавлення. Для хромо-нікелевих сплавів Д = 1,65 · 10^{10} кДж / (кг·м^3);

η – ККД плазмотрону;

R_0 - радіус сопла, R_0 = 0,002 м;

lk - відстань від точки вводу порошку до зрізу сопла, lk = 0,01м;

R - поточний радіус траєкторії частинок, R = 0,9 R_0;

lk+6(R_0 – R) – шлях руху частки в ізотермічному ділянці струменя.

Чим більший параметр тяжкості плавлення, тим більшу теплову потужність слід підвести до струменя для того, щоб нагріти частки до стану їх проплавлення.

Зміна теплової потужності залежно від параметра Д при різних витратах плазмоутворюючого газу змінюється.

Зробимо розрахунок зміни теплової потужності плазмотрону в залежності від ККД при різних фракціях порошку. Розрахунок провадимо в табличній формі.

Таблиця 2.5 Розрахункова таблиця

ККД	Діаметр часток порошку, мкм				
	20	40	60	80	100
0,1	10,630	21,260	31,890	42,520	53,150
0,2	5,315	10,630	15,945	21,260	26,575
0,3	3,543	7,087	10,630	14,173	17,717
0,4	2,658	5,315	7,973	10,630	13,288
0,5	2,126	4,252	6,378	8,504	10,630
0,6	1,772	3,543	5,315	7,087	8,858

На підставі результатів розрахунку побудуємо графічну залежність теплової потужності плазмотрону від ККД та діаметра частинок порошку.

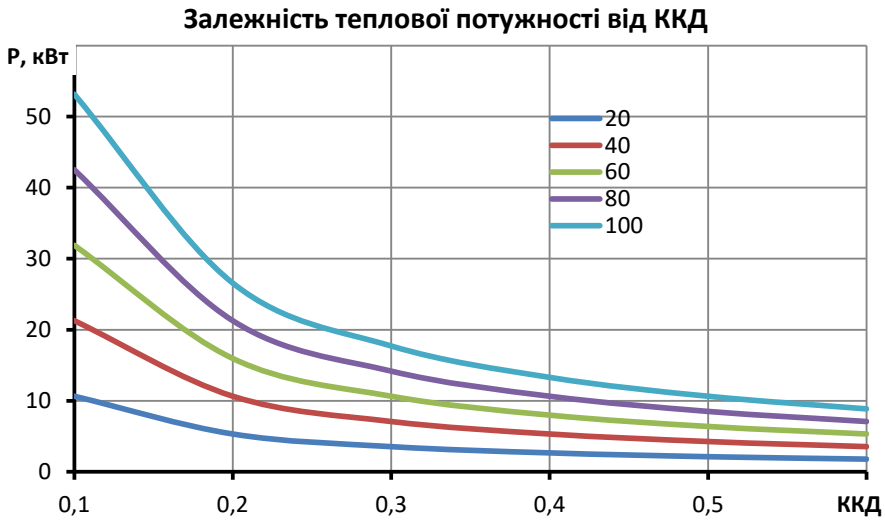


Рисунок 2.8 Зміна теплової потужності (кВт) від ККД при різних фракціях порошку (мкм) для напилення

2.5 Вибір режиму плазмового напилення з урахуванням термічного циклу

В даний час для розрахунку режимів плазмового напилення сплавами, що самофлюсуються, з наступним або послідовним оплавленням відсутні формули розрахунку основних параметрів.

Для визначення режимів користуються таблицями, в яких дано параметри напилення залежно від матеріалу, що напилюється (фізико-хімічні властивості), грануляції використовуваного порошку, від використання плазмоутворюючого газу, дистанції напилення та інших параметрів. Однак ці дані дають тільки орієнтовні параметри, що іноді не збігаються один з одним, при аналізі цих даних. З іншого боку, в них не враховується хімічний склад основи, на яку наносять матеріал, що напилюється, наприклад на вміст вуглецю. Так як середньовуглецеві сталі, що мають велику схильність до утворення холодних тріщин після напилення з оплавленням, то і сам процес повинен проходити з підвищеною погонною енергією і, як правило, з попереднім підігрівом (для сталі 40Х температура підігріву Тпід=250-300°С). Це потрібно зниження швидкості охолодження зони термічного впливу.

З вищесказаного слід, що початковий вибір параметрів при плазмовому напиленні виробляють виходячи з табличних даних, а остаточний – у процесі експериментів чи результатів розрахунків термічного циклу плазмового напилення на конкретну сталь.

Згідно з табличними даними для плазмового напилення з оплавленням на сталь 40Х рекомендуються основні параметри: величина струму; напруга; витрата плазмоутворюючого газу.

2.5.1 Розрахунок термічного циклу напилення

При напиленні з використанням плазмового струменя на низьколеговані середньовуглецеві сталі необхідно підбирати такий термічний цикл, який

задовольняв би вимогам, що забезпечують якісну сполуку нанесеного покриття.

Напилення проводиться самофлюсуючим сплавом на основі Ni-Cr-B-Si з оплавленням (нагрівання до 950 ° С). Нанесений шар забезпечує жорсткість HRC 45-62.

Зробимо розрахунки термічних циклів на різних режимах напилення. Очікувану структуру можна оцінити за допомогою діаграми термокінетичного розпаду аустеніту.

У лабораторії газотермічного напилення ХНІ НУК було зроблено напилення зразків на наступних режимах (**режим 1**):

$I_{пл}$ = 300А;

$U_д$ = 28В;

$V_{нап}$ = 0,25 см/с;

$q = I_{пл}\ U_д\ \eta$ = 3360 Вт.

При напиленні на масивний виріб:

$$T(r_0,t) = \frac{q}{2\pi\lambda Vt} e^{-\frac{r_0^2}{4at}}$$

де:

λ - коефіцієнт теплопровідності (λ=0,4 Вт/см К);

$c\gamma$ - об'ємна теплоємність ($c\gamma$=5 Дж/см^3 К);

$T_{наг}$ - температура нагрівання ($T_{наг}$ = 950°С);

A - коефіцієнт температуропровідності (a=0,08);

Q - ефективна теплова потужність джерела;

η - ефективний коефіцієнт нагріву (η=0,4);

r_o - відстань від джерела до розглянутої точки.

$$r_0 = \sqrt{\frac{0{,}368q}{\frac{\pi}{2}Vc\gamma Tл}}$$

r_o =0,86 см

Таблиця 2.6 Нагрів й охолодження основи при плазмовому напиленні (режим 1)

t, с	0,1	0,3	0,4	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	100	200
Т, ˚С	20	20	61	124	548	860	844	770	693	626	569	521	480	444	258	185	146	122	72	46

Миттєва швидкість охолодження:

$$\omega_{охл} = 2\pi\lambda \frac{(T - T_0)^2}{q / V}$$

$\omega_{охл}$ = 128,76 ˚С/с

Швидкість охолодження дуже велика. У підкладці міститься велика кількість мартенситу (близько 98%). Твердість по Виккерсу близько 572HV. Можливе утворення холодних тріщин. Це видно при розрахунку складу структури основи при дії термічного циклу на даному режимі. Крива охолодження наведена на рисунку 2.9.

Розрахуємо термічний цикл для режиму наплавлення, запропонованого даними літературного джерела (14). **Режим 2**:

$I_{пл}$ = 300А;

$U_д$ = 30В;

$V_{нап}$ = 0,25 см/с;

$q = I_{пл}\ U_д\ \eta$ = 4200 Вт.

Для даного режиму r_o = 0,96 см.

Таблиця 2.7 Цикл нагріву й охолодження при плазмовому напиленні (режим 2)

t, с	0,1	0,3	0,4	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	100	200
Т, ˚С	20	21	32	61	390	806	869	831	770	708	652	602	559	521	309	222	176	146	85	53

Миттєва швидкість охолодження складе:

$\omega_{охл}$ = 103,01 ˚С/с

Крива охолодження наведена на рисунку 2.9. Миттєва швидкість охолодження велика, метал підкладки має мартенситну структуру. Велика ймовірність утворення холодних тріщин. Основа має у своєму складі близько 97% мартенситу. Твердість близько 560 HV.

Для зниження миттєвої швидкості охолодження можна збільшити погонну енергію напилення за рахунок збільшення струму й напруги. **Режим 3**:

$I_{пл}$ = 400А;

$U_д$ = 32В;

$V_{нап}$ = 0,25 см/с;

$q = I_{пл}\ U_д\ \eta$ = 5120 Вт.

Для режиму 3 відстань від джерела до розглянутої точки складе r_o = 1,06 см.

Таблиця 2.8 Нагрів й охолодження підкладки при плазмовому напиленні, режим 3.

t, с	0,1	0,3	0,4	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	100	200
Т, ˚С	20	20	23	34	259	718	858	863	825	775	723	676	632	593	362	262	207	172	99	60

Миттєва швидкість охолодження $\omega_{охл}$ = 84,5 ˚С/с:

Крива охолодження наведена на рисунку 2.9. При накладенні кривої охолодження на діаграму термокінетичного перетворення аустеніту можна визначити, що при даних параметрах режиму не можна гарантувати якість напилювання, тому що швидкість охолодження задоволено велика. У підкладці близько 95% мартенситу.

Режим рекомендований:

Ефективна теплова потужність режиму залишається такою же, як і на режимі 3 (q = 5120 Вт), але напилення ведеться з попереднім підігрівом валу. Для низьколегованої сталі 40Х рекомендується температура попереднього підігріву $T_{под}$ = 250 - 400°С. Встановимо $T_{под}$=300°С.

Відстань від джерела до розглянутої точки складе r_o = 1,03 см.

Таблиця 2.9 Охолодження основи при плазмовому напиленні (режим рекомендований)

t, сек	0,1	0,3	0,4	0,5	1,0	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	100	200
T, ˚C	300	300	300	310	354	484	716	854	922	947	948	937	919	898	700	585	515	469	367	311

Миттєва швидкість охолодження $\omega_{охл}$ = 37,1 ˚C/c. У цьому випадку одержуємо прийнятну швидкість охолодження. Крива охолодження наведена на рисунку 2.9.

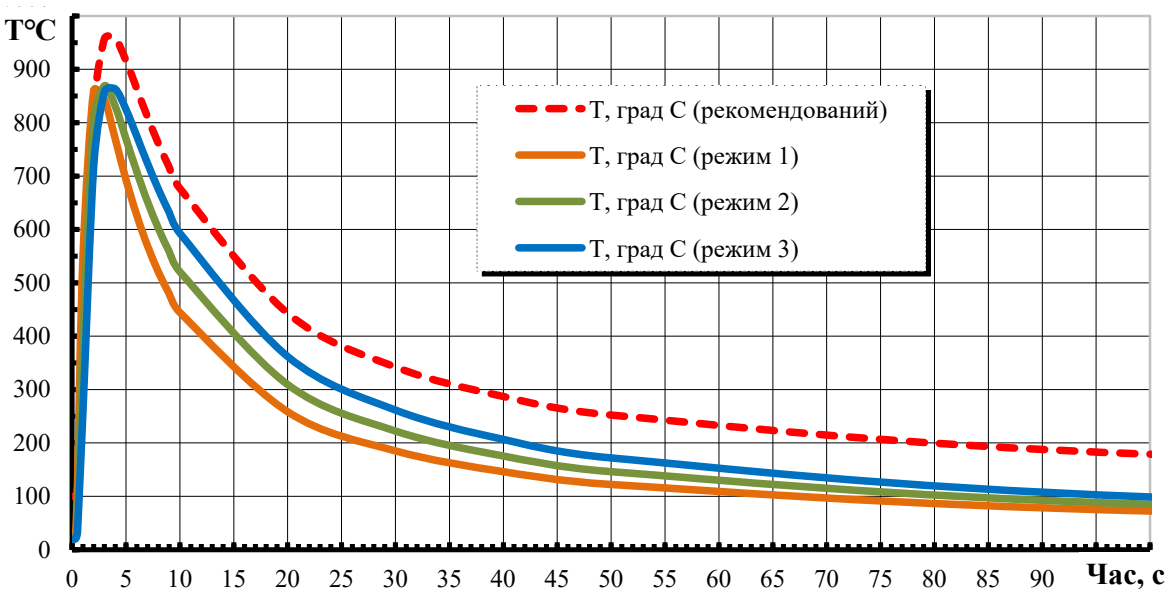


Рисунок 2.9 Нагрів та охолодження при плазмовому напиленні

Мартенситу близько 47%. Утворення гартівних структур не відбувається, отже, відсутня ймовірність утворення холодних тріщин.

Для визначення твердості зони термічного впливу, необхідно накласти криві охолодження (рисунок 2.9) на діаграму термокінетичного розпаду аустеніту (рисунок 2.10) для низьколегованої сталі 40Х.

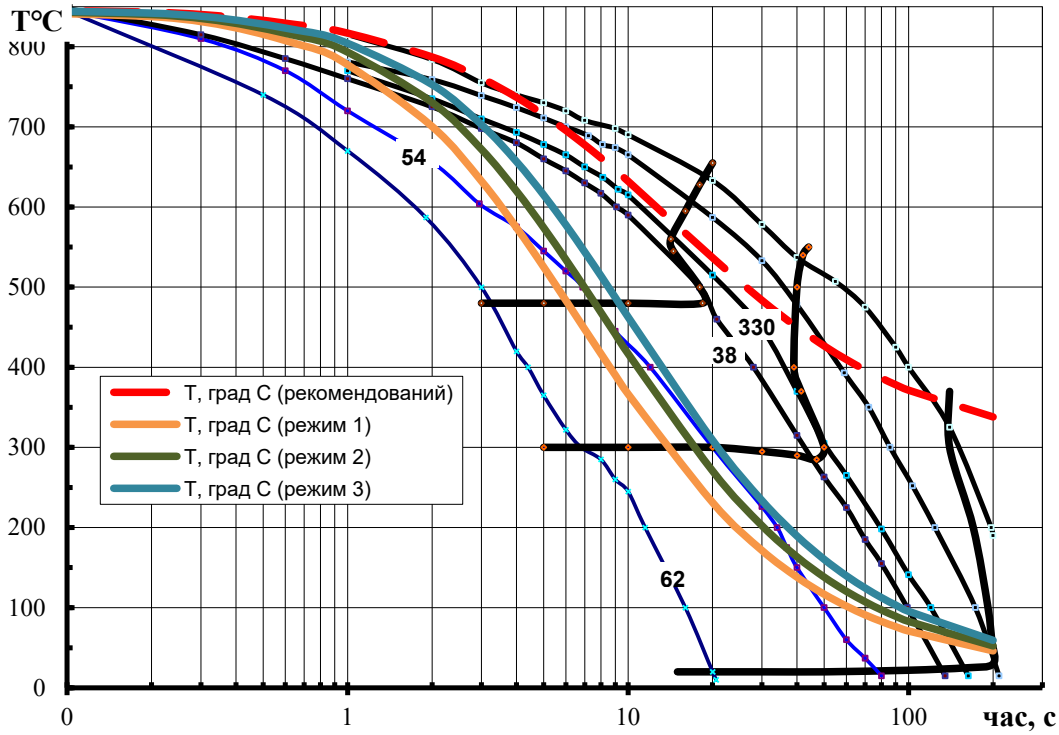


Рисунок 2.10 Діаграма термокінетичного розпаду аустеніту при плазмовому напиленні з наступним оплавленням покриття

Режим рекомендований можна вважати оптимальним для даного процесу напилювання.

2.5.2 Розрахунок очікуваних структур після напилення

Розрахунок очікуваних структур провадиться по формулах, розробленим в ІЕЗ ім. Патона, що дозволяє прогнозувати фазовий состав високотемпературних ділянок ЗТВ й її механічні властивості. Параметри $\tau_м$, $s_м$, $\tau_ф$, $\tau_{ф+п}$, $s_ф$, $s_{ф+п}$ розраховуються залежно від складу сталі по наступних рівняннях регресії:

$$\ln \tau_м = -2{,}1 + 15{,}5\,C + 0{,}96\,Mn + 0{,}84\,Si + 0{,}65\,Cr + 0{,}74\,Mo + 0{,}55\,Ni + 0{,}3\,V + 4{,}0\,Al + 0{,}5\,W + 0{,}8\,Cu - 0{,}25\,Nb - 13{,}5\,C^2 - 0{,}8\,Si^2;$$

$$\ln \tau_м = 3{,}2$$

ln $s_м$ = 0,56 - 0,41 *C* + 0,1 *Mn* + 0,14 *Cr* - 0,3 *Mo* + 2,7 *Ti* - 1,1 *Nb* + 0,5 *Cu* + 1,7 *C Mo*;

ln $s_м$= 0,79

ln $\tau_ф$ = 0,66 + 10 *C* + 1,3 *Mn* - 0,48 *Si* + 1,3 *Cr* + 1,5 *Mo* + 0,8 *Ni* - 1,4 *W* + 3,5 *C Mn* – 50 *C V* - 5,9 C^2 + 0,8 Si^2;

ln $\tau_ф$ = 6,35

ln $s_ф$ =1,23 + 0,17 *Mn* - 0,34 *Si* + 0,3 *Cr* - 0,5 *Mo* + 0,31 *Ni* + 0,09 *Nb* - 0,43 *W* - 0,3 *Cu*;

ln $s_ф$ = 1,53

ln $\tau_{ф+П}$ = 0,34 + 5,2 *C* + 1,8 *Mn* + 0,53 *Si* + 0,33 *Cr* + 2,9 *Mo* + 0,86 *Ni* + 1,5*W* + 1*Cu* – 60 *C V* - 5,1 C^2 + 0,7 Si^2;

ln $\tau_{ф+П}$ = 3,16

ln $s_{ф+П}$= 0,91 – 0,9 *C* + 0,09 *Mn* + 0,08 *Cr* + 0,34 *Mo* + 0,15 *Ni* + 0,85 *V* + 2,2*Ti* + 0,43 *W*;

ln $s_{ф+П}$ = 0,85

Розрахунок очікуваних структур після плазмового напилення зробимо для рекомендованого режиму:

$U_д$=32В;

$I_{св}$=400А;

$V_н$=0,25 см/с;

q = 5120Вт;

$T_{под}$=300°С.

Тривалість охолодження, при напиленні на масивний виріб, визначається по формулі:

$$\tau = \frac{q}{2\pi\lambda V}\left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0}\right)$$

де: q- ефективна теплова потужність зварювального джерела нагріву;

λ- коефіцієнт теплопровідності;

V- швидкість наплавлення;

T_0- початкова температура виробу.

$\tau = 24{,}46$ $\ln \tau = 3{,}2$

Процентне співвідношення структурних складових у ЗТВ розраховується по наступних формулах:

- кількість мартенситу:

$$M(\tau) = 100\left[1 - \Phi\left(\frac{\ln\tau - \ln\tau_м}{\lg s_м}\right)\right],\%$$

M(τ) = 50,0%

$\Phi(x)$ - інтегральна функція нормального розподілу;

τ- тривалість охолодження, що відповідає утворенню структури металу з 50%-м утриманням мартенситу;

$s_м$- константа, що характеризує крутість спаду кривій утримання мартенситу в міру збільшення тривалості τ.

$\Phi(\tau)$- кількість фериту:

$$\Phi(\tau) = \Phi_{\max}\Phi\left(\frac{\ln\tau - \ln_ф}{\ln s_ф}\right),\%$$

Φ_{max}- максимальна кількість фериту, що може виділитися з аустеніту при дуже повільному охолодженні.

$$\Phi_{\max} = 100\left[\frac{1-(C-0{,}02)}{0{,}81 - 0{,}11Mn - 0{,}05Mo}\right], \%;$$ ***Φmax*** = 52% ***Φ(τ)*** = 1%

[Ф+П](τ)- сумарна кількість фериту й перліту:

$$[\Phi + П](\tau) = 100\Phi\left(\frac{\ln\tau - \ln\tau_{ф+П}}{\ln s_{ф+П}}\right)\ \%;$$ ***[Ф+П](τ)*** = 52%

Б(τ)- кількість бейніту:

Б(***τ***)=100-М(*τ*)-[Ф+П](*τ*), %; ***Б(τ)*** = 2%

П(τ)- кількість перліту:

П(τ)=[ф+П](τ)-ф(τ), %; ***П(τ)*** = 51%

Механічні властивості ЗТВ залежно від структурного стану й режиму охолодження визначають по наступних емпіричних формулах:

$HV = M(\tau)*(309 + 494*C + 622*C^2 + 17{,}7*Mn) + Б(\tau)*(234 + 122*C) + [Ф+П](\tau)*(98 + 275*C + 15{,}4*Mn) = 406$;

$\sigma_в = M(\tau)*(798 + 3215*C) + Б(\tau)*(590 + 960*C + 39{,}7*Mn + 200*V) + [Ф+П](\tau)*(297 + 1360*C + 60*Mn + 140*V) = 1433$МПа;

$\sigma_{0,2} = M(\tau)*(662 + 1610*C) + Б(\tau)*(500 + 460*C + 120*C^2 + 150*V) + [Ф+П](\tau)*(187 + 926*C + 47*Mn + 90*V) = 918$МПа;

$\delta = M(\tau)*(12{,}2 - 67*C^2 - 1{,}5*Mn + 0{,}76*\ln\tau) + Б(\tau)*(21{,}3 - 35{,}6*C - 4*Mn - 5*V + 1{,}84*\ln\tau) + [Ф+П](\tau)*(36{,}5 - 127*C + 153*C^2 - 1{,}16*Mn + 0{,}66*\ln\tau) = 7{,}9\%$;

$\psi = M(\tau)*(48{,}5 - 158*C - 116*C^2 + 0{,}98*\ln\tau) + Б(\tau)*(53{,}3 - 132*C + 103*C^2 - 5{,}1*Mn - 10*V + 3{,}4*\ln\tau) + [Ф+П](\tau)*(65{,}4 - 88*C - 82*C^2 - 6{,}7*Mn + 18*V + 0{,}6*\ln\tau) = 13{,}0\%$;

$KCИ = M(\tau)*(1{,}06 - 2{,}8*C + 1{,}3*C^2 - 0{,}081*Mn + 0{,}05*\ln\tau) + Б(\tau)*(1{,}3 - 1{,}6*C - 0{,}08*Mn) + [Ф+П](\tau)*(1{,}47 - 1{,}8*C + 0{,}8*C^2 - 0{,}076*Mn - 0{,}045*\ln\tau) = 0{,}6$ (Дж/м^2).

Результати проведеного розрахунку механічних властивостей ЗТВ наведені у таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 Механічні властивості ЗТВ залежно від структурного стану та режиму охолодження

Показник/режим	рекомендований	режим 1	режим 2	режим 3
Твердість HV	406	590	585	579
Межа міцності, МПа	1433	1997	1983	1963
Умовна межа плинності, МПа	918	1260	1251	1239
Відносне подовження, %	7,9	2,9	3,2	3,4
Відносне звуження, %	13,0	6,8	7,1	7,5
Ударна в'язкість, МДж/м^2	0,5	0,2	0,2	0,3

Виводи: Вибір режиму з підігрівом деталей перед плазмовим напиленням дозволяє звести до мінімуму ризик утворення холодних тріщин в ЗТВ. Завдяки низької швидкості охолодження більша частина аустеніту не встигає переохолодитися й перетворення аустеніту відбувається вище температури $M_н$ або трохи нижче її, а мартенсит, що утвориться, виходить менш крихкий і напружений. Твердість структури, що утвориться, по термоциклу на рекомендованому режимі становить порядку 406 HV.

При напиленні на режимі 1 отримана твердість у ЗТВ становить порядку 590 HV. При такій твердості ймовірність утворення холодних тріщин дуже висока. Це відбувається через високу швидкість охолодження й говорить про те, що обраний режим напилення має малу погонну енергію й для наплавлення на сталь 40Х не годиться.

Режим 2 показав, що хоча погонна енергія його вище, ніж на режимі 1, але отримана структура металу в ЗТВ має твердість порядку 585 HV.

На режимі 3 підняли ще струм і напругу. Отримали твердість ЗТВ трохи менше 578 HV.

Можна зробити висновок, що уникнути утворення структури мартенситу з високою твердістю раціонально, застосувати попередній підігрів. Наплавлення на параметрах режиму 3, але з попереднім підігрівом ($T_{под}$ = 300°С) підтвердила істинність цього припущення (режим рекомендований). У ЗТВ твердість 406 HV, а мартенситу 50, що довільно не плохий результат.

2.6 Технологія та техніка процесу напилення

Відновлення циліндричних поверхонь деталей машин методом газотермічного напилення з подальшим оплавленням широко застосовується для відновлення розмірів і підвищення експлуатаційної довговічності валів, пальців, штовхачів, циліндричних штоків та інших деталей, що працюють в умовах тертя та ударно-циклічних навантажень.

У цьому випадку процес напилення та процес оплавлення здійснюється одним і тим же пальником при тій же потужності стисненої дуги, при частоті обертання 10 – 14 хв-1, при оплавленні з наближенням пальника до деталі на відстань 50 – 70 мм. Основою технології є формування високоміцного поверхневого шару із самофлюсувальних порошкових сплавів типу Ni–Cr–B–Si з подальшим їх оплавленням для створення монолітної металургійної структури.

Процес відновлення складається з послідовних стадій:

1 Підготовка поверхні — очищення, механічна обробка, шорсткування.

2 Плазмове напилення самофлюсуючого сплаву, що формує пористий адгезійний шар.

3 Оплавлення покриття, у результаті якого порошок переходить у щільний металевий шар із мінімальною пористістю.

4 Фінішна механічна обробка до номінального розміру й заданої шорсткості.

У випадку циліндричних поверхонь ключовим є забезпечення рівномірності теплового внеску по периметру деталі, збереження геометрії циліндра та формування однорідної структури на всій площі.

При відновленні циліндричних деталей одним із найраціональніших методів є плазмове напилення з оплавленням. Такий підхід дозволяє формувати покриття з високою адгезією, дрібнозернистою мікроструктурою та підвищеною зносостійкістю.

Напилення і оплавлення можуть здійснюватися однією і тією ж плазмовою пальниковою системою. Для циліндричних поверхонь важливо забезпечити:

1. стабільну частоту обертання деталі (10–14 $хв^{-1}$),
2. контрольовану робочу відстань пальника (50–70 мм),
3. однакову інтенсивність теплового впливу по всій окружності.

Ці фактори визначають рівномірність шару, відсутність овальності та правильне формування розплавленої ванни під оплавленням.

Плазмовий струмінь має високу ентальпію та швидкість витікання. Це створює ризики:

1 локального перегріву напиленого шару,
2 недостатнього прогрівання основи,
3 утворення тріщин при різкому охолодженні,
4 руйнування структури покриття від динамічного тиску струменя.

Для циліндричних поверхонь ефект посилюється тим, що площа контакту дуги з поверхнею постійно змінюється внаслідок обертання деталі. Тому важливі стабілізація подачі та вирівнювання теплонапруженого стану по колу.

Правильні режими забезпечують:

1 плавне проплавлення міжшарних пор,
2 формування металургійного контакту з основою,
3 мінімальні деформації циліндричної форми.

На якість наплавлення впливають такі параметри:

1. Швидкість подачі (переміщення плазмотрона). Зі збільшенням струму дуги можна підвищувати швидкість переміщення пальника вздовж твірної циліндра. Це дозволяє уникати перегріву та зберігати циліндричність поверхні. Оптимальне співвідношення струму та подачі гарантує рівномірну товщину напиленого та оплавленого шару.

2. Витрата плазмоутворювального газу. Для циліндричних поверхонь критично важлива стабільність температури плазмового факела. Надлишкові витрати газу знижують температуру й погіршують якість оплавлення, тоді як недостатні — викликають нестабільність форми плями нагріву, що призводить до неоднорідності шару по колу.

3. Робоча відстань пальника. При збільшенні відстані до поверхні струмінь розширюється, що знижує щільність теплового потоку. Для валів та інших циліндричних деталей це призводить до:

- нерівномірного прогріву,

- формування зон неповного проплавлення,

- порушення геометричної точності.

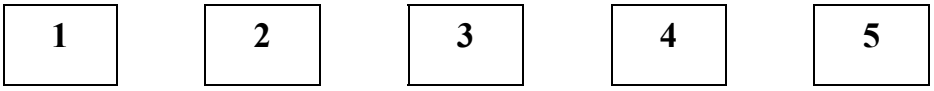
Істотним недоліком плазмового нагріву є те, що плазмовий струмінь, володіючи високою температурою і значною концентрацією енергії, дуже швидко нагріває поверхню покриття при недостатньому нагріванні поверхні деталі і тим самим часто призводить до згортання покриття, що оплавляється. Крім того, в результаті високої швидкості закінчення плазмового струменя і значного тиску на поверхню, що напилюється, також може відбутися порушення шару покриття. Плазмове оплавлення рекомендується застосовувати для малогабаритних деталей діаметром не більше 50 мм, таких як штовхач, пальці поршневі, кулачкові вали і т.д.

На якість оплавлення циліндричних деталей стиснутою дугою непрямої дії впливає швидкість переміщення плазмотрона (подача). Збільшення подачі з підвищенням сили струму пояснюється зростанням кількості теплоти, що припадає на одиницю площі поверхні, що оплавляється.

Однак незважаючи на те, що спосіб напилення з оплавленням дозволяє отримувати високоякісні зносостійкі покриття з мінімальним припуском на механічну обробку широке застосування при відновленні деталей не отримало. Процес напилення з оплавленням є трудомістким і за продуктивністю поступається процесам отримання покриттів наплавленням та електролітичними способами. Застосування дорогих порошків, що самофлюсуються, підвищує собівартість відновлення. Нагрівання покриття і деталі при оплавленні досягає 1100 °С, що вище температур фазових перетворень, і всі недоліки, характерні для наплавлення, притаманні цьому способу.

2.7 Розробка техпроцесу відновлення валів

Технологічний процес відновлення або зміцнення поверхонь плазмовим напиленням порошковими матеріалами в загальному випадку складається з таких операцій (див. рис. 2.11)



1 – хімічне очищення 2 - просушування; 3 - напилювання; 4 – шліфування; 5 - контроль якості

Рисунок 2.11 Схема технологічного процесу напилення.

Перед нанесенням будь-яких покриттів поверхня деталі підлягає обов'язковому знежиренню. Після знежирення у водних розчинах деталі ретельно промивають водою для видалення залишків реагентів.

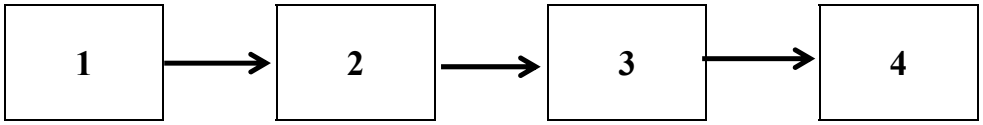
Просушування деталей після промивання здійснюють у сушильних шафах при температурі 60–150 °С або шляхом обдування стисненим повітрям згідно з ГОСТ 9.010-73.

Для деталей та виробів, знежирення яких наведеними способами є технологічно або економічно недоцільним, допускається використовувати механічне знежирення - протирання поверхні щітками або протирочним матеріалом, змоченим уайт-спіритом або бензином.

Перед використанням порошкових матеріалів їх суміші необхідно просушити в сушильних шафах при температурі 130-150^{0}С протягом 3-5 годин.

Деталі, які підготовлені до нанесення покриттів, повинні зберігатися в приміщенні при температурі не нижче 18^{0}С та відносної вологості повітря не вище 75%. В повітрі не допускається вміст корозійно-активних агентів та попадання на поверхню бризок води та інших рідин.

Для відновлення деталей типу штока плунжерного насосу плазмовим напиленням застосовуємо технологічний процес з 4 операцій (див. рис.2.8.)



1 - операція хімічного очищення; 2 - плазмове напилення і оплавлення; 3 - шліфування; 4 - контроль якості

Рисунок 2.12 Схема технологічного процесу відновлення деталей.

Перелік операцій та переходів, устаткування по технологічному процесу відновлення валів методом плазмового напилювання зазначений в табл. 2.11.

Таблиця 2.11 Перелік операцій та переходів при напилюванні

Найменування операцій	Перелік переходів операцій	Найменування і тип обладнання
Хімічне очищення	1.Завантажити партію деталей в ванну. 2.Очищення. 3.Вивантаження.	Ванна Решітчатий контейнер
Плазмове напилення і оплавлення покриття	1.Встановити деталь у механізм обертання. 2.Установить плазмотрон для напилювання 3.Напилити поверхню валу до товщини 1,0 мм і провести оплавлення покриття. 4. Зняти деталь з механізму обертання та відправити на наступну операцію.	Механізм обертання (токарно-гвинторізний верстат 16К20) Плазмотрон ПП-25
Шліфування	1.Здійснити шліфування робочої поверхні валу 2.Полірувати деталь. 3.Зняти деталь.	Шліфувальний верстат
Контроль якості	1. Здійснити перевірку якості напилюваного покриття. 2. Укласти деталі, що пройшли контроль, на стелаж.	Візуальний огляд

При напилюванні особлива увага звертається: підготовці напилюваної поверхні; підготовці напилюваних порошків; вибору режимів напилювання; напилюванню та оплавленню отриманого покриття.

2.8 Контроль якості нанесених покриттів

Контроль якості напилюваного шару забезпечує виготовлення доброякісних деталей, що відповідають вимогам відповідних ГОСТ та ТУ на ремонт, і дозволяє запобігти передчасному аварійному виходу деталей з ладу. Контроль якості не слід розглядати лише як перевірку кінцевого результату напилювання — це лише його заключна стадія.

Контроль повинен здійснюватися на всіх стадіях виробництва і включає:

- попередній контроль — перевірка напилюваних матеріалів, робочих газів та вибраковка деталей.
- поточний контроль — забезпечення дотримання технологічного процесу під час напилювання.
- приймальний контроль — визначення придатності відновлених деталей до експлуатації [2].

Контроль якості напилюваних матеріалів. Перевірка матеріалів включає визначення:

- однорідності за зовнішнім виглядом;
- розміру зерен порошку;
- об’ємної маси;
- вологості.

Розмір зерен контролюють шляхом просіювання через сито відповідного калібру.

Вологість порошку визначають так:

- беруть 100 г порошку;
- просушують при температурі 150–200 °С;
- зважують через визначені проміжки часу.

Процес просушування припиняють, коли результати передостаннього та останнього зважування збігаються. Допустима вологість порошку — не більше 0,1 %.

Контроль техпроцесу включає:

- ознайомлення робітника з послідовністю операцій;
- дотримання режимів напилювання;
- забезпечення правильного розміру (товщини) наносимого матеріалу.

Особливу увагу слід приділяти дотриманню режимів напилювання, оскільки це критично впливає на якість покриття.

Візуальний контроль. Контроль за зовнішнім виглядом проводиться для виявлення дефектів:

- зколів;
- здуття;
- відшарування покриття.

Огляд здійснюють за допомогою лупи десятикратного збільшення типів ЛИ-3 або ЛИ-4 згідно ГОСТ 8309-75, ГОСТ 2594-75, при достатньому освітленні.

Контроль товщини та геометрії покриття. Товщину покриття вимірюють штангенциркулем або мікрометром відповідно до ГОСТ 6507-78.

Геометричні розміри, які виявляються недопустимими, підлягають виправленню.

Після усунення дефектів проводять повторний контроль тими ж методами.

					МР 132.6121м.07.03.04. ПЗ		
Змін.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дата			
Студент		Стефурак Д.П..			3 Дослідження властивостей плазмових покрить	Літ.	Арк. 64 / Аркушів 15
Консультант							
Керівник		Спіхтаренко В.				ХННІ НУК	
Н. Контр.							
Зав.кафедр.		Матвієнко М.В.					

Газотермічні покриття мають характерну смолянисту структуру. Частки вихідного матеріалу піддаються різним фізико-хімічним перетворенням, у тому числі і за рахунок взаємодії з активним довкіллям, по цьому властивості покриттів відрізняються від властивостей вихідного матеріалу вміст кисню і азоту в покриттях може досягати десятих доль відсотка і більш; при формуванні покриття на підкладці «виробів» в нім утворюються пори; пластичність напиленого металу нижча, ніж в початкового; міцність напиленого матеріалу зазвичай в 5…10 разів нижче за міцність початкового; змінюється фазовий склад, теплопровідність і електрична провідність напиленого матеріалу і ін.

3.1 Визначення міцності зчеплення покриття з основою

Властивості покриттів залежать від технологічних параметрів процесу, що дозволяє реформувати ці властивості в широких межах. На ряду з такими загальними чинниками, що впливають на властивості газотермічних покриттів, як: пористість, що виникає внаслідок газовиділення і кристалізації часток з високими швидкостями, а також виплеску матеріалу покриття при ударі часток об підкладку; внутрішнє напилення у всьому об'ємі напилюваного матеріалу і в об'ємі кожної частки, важливе місце займає знижена міцність зчеплення на границях між частками і шарами покриття, а також неповним схоплюванням, а також підвищеним вмістом оксидів, пор і інших включень в областях, що покриваються.

Виміри міцності зчеплення переслідують наступні цілі:

- оцінити ефективність зміни режимів нанесення покриттів і обробки поверхні під покриття і таким чином оптимізувати умови досягнення необхідної міцності зчеплення;

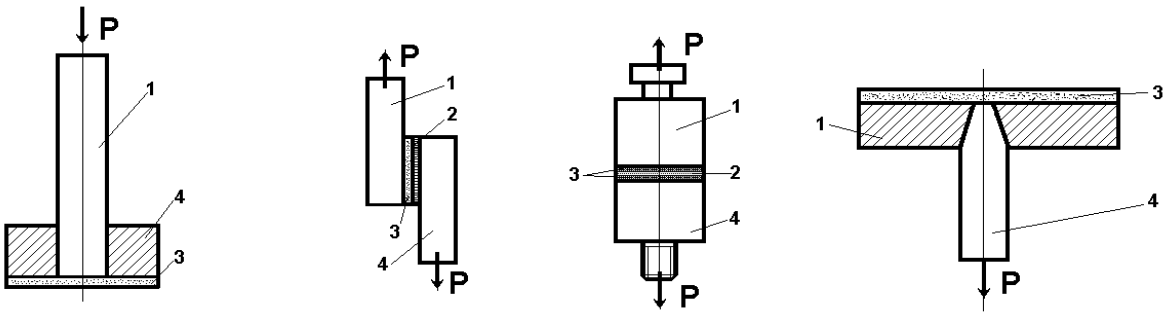
- відокремити деталі з недопустимою міцністю зчеплення покриттів від придатних;

- отримати глибші уявлення про механічні утворення міцних адгезійних зв'язків між покриттям і основою.

Випробування міцності зчеплення газотермічних покриттів з основою можна розділити на методи визначення кількісних характеристик (на відрив за клейовою і штифтовою методикою, на зріз для циліндричних і призматичних зразків) і методи для якісної оцінки (дряпанням, за оцінкою відшарування, лазерним тепловим ударом).

У ряді випадків існуюча різноманітність методів визначення міцності зчеплення не дозволяє скласти результати проведених лабораторних досліджень. Слід встановити такі методи випробувань, які дозволили зіставити результати різних досліджень.

Для проведення випробувань на міцність зчеплення покриття з основою було проаналізовано кілька методик.



1.Верхній зразок. 2. Клей. 3. Покриття. 4. Нижній зразок.

Рисунок 3.1 Зразки випробувань міцності зчеплення покриття з основою.

Після нанесення покриттів на торцеву поверхню зразка (зразки 1, 3, 4) встановлювали в розривній машині (У10). Навантаження, коли відбувається відділення зразка від покриття, фіксується приладами машини. Випробування проводили зі швидкістю навантаження – 15 мм/с.

Відношення максимального зусилля Р до площі торця штифта (рисунок 3.1) приймають за характеристику міцності зчеплення покриття. Для випробувань застосовують конічний штифт, оскільки у разі циліндричного штифта

результат спотворюється внаслідок впливу сили тертя між поверхнями, що сполучаються штифта і шайби. До переваг штифтового методу відносяться:

- можливість багаторазового використання зразків;

- відсутність підготовчих стадій;

- оперативність;

- можливість визначення міцності будь-яких покриттів.

Водночас штифтовий метод має низку недоліків:

- його використання дозволяє визначати міцність зчеплення тільки при товщині покриття більше 0,3-0,5 мм, при меншій товщині переважає когезійний механізм руйнування;

– величина зазору між штифтом та шайбою сильно впливає на результат. При дуже малій величині зазору (деталі притерті) збільшуються сили Ван-дер-Ваальса. При великому зазорі в нього потрапляють напилювані частинки і розклинюють поверхні, що сполучаються. В обох випадках відбувається спотворення результатів;

- на результат впливають розміри зразка. Так, для детонаційних покриттів збільшення діаметра штифта від 1 до 2,5 мм міцність зчеплення зменшується, при подальшому збільшенні залишається практично незмінною. Зменшення діаметра шайби призводить до зменшення міцності зчеплення. Рекомендується застосовувати штифт та шайбу діаметрами 2 та 20 мм, відповідно [13];

– при навантаженні спостерігається руйнування покриття по периметру штифта з одночасним руйнуванням адгезійним по межі розділу «покриття – штифт». Це зумовлено складнонапруженим станом, при якому, крім нормальних напружень, виникають напруження зрізу та вигину. цей метод застосовується тільки для покриттів, у яких когезійна міцність значно вища за міцність з'єднання покриття з основним металом.

Адгезійна міцність характеризується нормальною напругою G, при якому покриття відокремлюється від основи та визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{P \cdot 4}{\pi \cdot d^2}$$

де: P - максимальне значення руйнівного покриття зусилля, Н;

d – діаметр штифта, мм.

Метод випробувань на зріз відрізняється меншою трудомісткістю при підготовці зразків, тут немає обмежень максимальної міцності зчеплення. Однак через складність у позиціонуванні площини різання його точність нижче і його застосування обмежено мінімальною товщиною покриття 0,5 мм.

Метод полягає в зрізі пуансоном покриття, нанесеного на бічну поверхню зразка.

Найбільш міцне зчеплення порошкового матеріалу з основою досягається шляхом напилення з подальшим або одночасним оплавленням, при цьому необхідно дотримуватись такої черги дій:

- напилити шар самофлюсуючого порошку товщиною 1 мм;

- оплавити покриття або підігріти до температури щонайменше 0,9 температури плавлення матеріалу покриття;

- далі чергувати напилення з оплавленням до отримання покриття необхідної товщини, при цьому слід стежити за якісним проплавленням кожного наступного шару.

Оплавлення покриття з сплавів, що самофлюсуються, рекомендується проводити відразу ж після напилення. Це дозволяє використовувати отримане раніше деталлю тепло та зменшити можливість тріщиноутворення та відшарування покриття при охолодженні.

У даному дослідженні було запропоновано методику випробування покриття на зріз. Для цього були виготовлені циліндричні зразки зі сталі 40Х (рисунок 3.2) діаметром 20 мм на поверхню яких наносилося покриття товщиною близько двох мм.

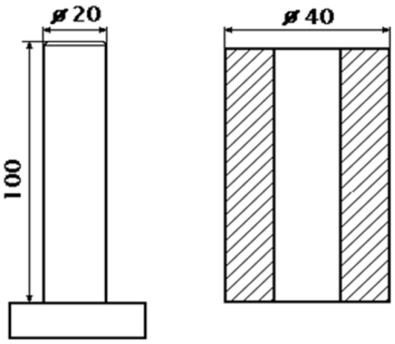
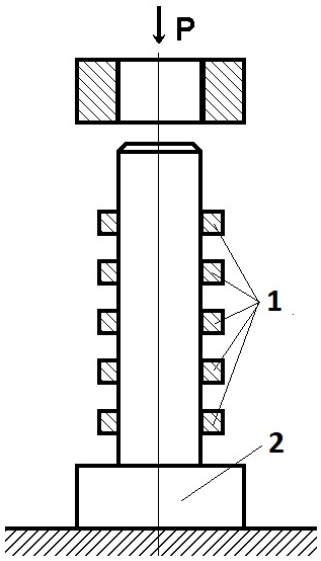


Рисунок 3.2 Загальний вигляд підготовленого зразка

Напилений шар проточується [14] по зовнішній поверхні до 24 мм. Потім у нанесеному шарі робилися проточки до основного металу для поділу напиленого шару на окремі кільця (рис. 3.3) шириною 2 мм, які випробовувалися на зріз. Площа зрізу - 125,6 мм^2.



1 - напилене покриття; 2 – зразок.

Рисунок 3.3 Підготовлений зразок для випробування

З кожного зразка отримуємо п'ять значень міцності зчеплення з основою. Значення заносимо до таблиці та визначаємо міцність зчеплення на зріз.

Результати механічних випробувань на зріз самофлюсуючих покрить наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Результати випробувань на міцність зчеплення покриття з основою

Номер зразка	Площа перерізу, мм^2	Середнє навантаження, кН	Напруження на зріз, МПа
1. ПГ-10Н-01	125,6	52,4	418
2. ПГ-10Н-04	125,6	44,53	354
3. ПГ-12Н-01	125,6	48,61	387
4. ПГ-12Н-02	125,6	50,21	400

Найбільш міцне зчеплення порошкового матеріалу з основою досягається шляхом напилення з наступним оплавленням (для порошку ПГ-12Н-02), а для останніх сплавів з одночасним оплавленням. При цьому необхідно дотримуватися такої черги дій:

- напилити шар порошку (ПГ-12Н-02) товщиною 1 мм;

- оплавити покриття або підігріти до температури не менше 0,9 температури плавлення матеріалу покриття;

- надалі чередувати напилення з оплавленням до отримування покриття необхідної товщини, при цьому необхідно слідкувати за якісним проплавленням кожного наступного шару.

- для інших сплавів кожен шар покриття оплавляється при температурі 800-900°С.

Товщина нанесеного шару покриття не менш 2 мм.

Оплавлення покриття з самофлюсуючих сплавів рекомендується здійснювати одразу ж після напилювання або одночасно. Це дозволяє використовувати отримане раніше деталлю тепло і зменшити можливість тріщино утворення та відслоєння покриття при охолодженні.

3.2 Визначення твердості покриття

Дослідження отриманих покриттів на твердість методом Роквелла проводилося на установці ТШ-2. Твердість по Роквеллу вимірюють безпосередньо по стрілочному індикатору твердоміра в умовних одиницях. Результати твердості Роквелла інтерпретують як числові значення, що відповідають глибині проникнення індентора під заданим навантаженням. Чим вище число твердості (наприклад, HRC 60), тим твердіший матеріал, оскільки глибина проникнення менша. Позначення твердості включає буквений індекс шкали (A, B, C), що враховує тип індентора і навантаження, тож значення між шкалами не взаємозамінні і повинні порівнюватися з урахуванням шкали.

Похибки вимірювань виникають через:

- нерівність та підготовку поверхні матеріалу (забруднення, іржа);

- занадто м’які або надто тверді матеріали, де глибина відтиску виходить за межі точності твердоміра;

- пластичну деформацію матеріалу, особливо при низьких твердостях (менше 20 HRC);

- неправильне встановлення навантаження або індентора.

Задля покращення точності рекомендують проводити кілька вимірювань і брати середнє, уникати пошкоджень індентора застосуванням правильної шкали, а також регулярно калібрувати прилад.

Стандарти (наприклад, ДСТУ ISO 6508) задають діапазони застосування кожної шкали і методику зменшення похибок. Через залежність між глибиною проникнення і твердою шкалою, похибка може бути більша, ніж у методів Брінелля чи Віккерса, але метод Роквелла швидший і менш трудомісткий для контролю якості металів.

Досліджувалися зразки, які були виготовлені для випробування на зріз покриття. Твердість замірялася на зовнішній поверхні у п'яти місцях, значення усереднювалося і заносилося таблицю.

Таблиця 3.2 Визначення твердості покриття

Матеріал	Зразок					HRC середнє
	1	2	3	4	5	
ПГ-10Н-01	60	58	62	60	63	60,6
ПГ-10Н-04	32	29	29	33	34	31,4
ПГ-12Н-01	44	42	40	39	43	41,6
ПГ-12Н-02	45	43	50	54	47	47,8

Найбільше значення твердості у зразка ПГ-10Н-01.

3.3 Дослідження зносостійкості антифрикційних матеріалів

Проблема підвищення зносостійкості шляхом використання композиційних порошків та сформованих із них захисних покриттів останнім часом набуває все більшої актуальності. Зносостійкість покриттів визначають за допомогою спеціальних випробувальних установок (стендів) та напилених зразків, а також стандартних методів, що моделюють характерні умови роботи деталей різних машин і механізмів.

Для визначення величини зносу матеріалу та розподілу зносу по поверхні тертя застосовують різні методи.

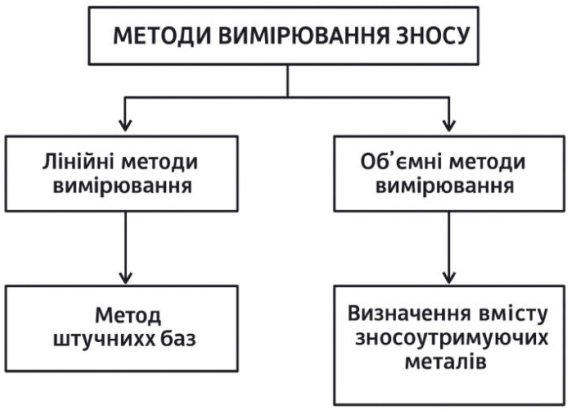


Рисунок 3.4 Методи вимірювання зносу при випробуванні

Найпоширенішим є метод визначення лінійного зносу. Вимірюючи геометричні параметри елементів пар тертя до та після випробувань і визнача-

ючи зміни лінійних розмірів, використовують мікрометри, а також контактні вимірювальні прилади з індуктивними датчиками та безконтактні прилади з пневматичними датчиками. Недоліком цього методу є те, що похибка вимірювання при незначних величинах зносу може бути відносно великою, а інколи й співставною з самим значенням зносу.

Кількість зношеного металу також можна визначати за його вмістом у мастильному матеріалі. Для цього відбирають пробу мастила, яку піддають спаленню, а в отриманій золі хімічними методами або спектрографічним аналізом визначають вміст металу. Варто зазначити, що цей метод є інтегральним для всього вузла тертя, оскільки продукти зношування надходять від кількох елементів, що є його суттєвим недоліком.

Для визначення величини зносу надалі використовуватимемо метод штучних баз, який є менш трудомістким і забезпечує достатньо високу точність визначення зносу.

Усі зразки повинні випробовуватись у однакових умовах. Виходячи з технічних даних установки, зусилля на ролик, що обертається, не повинно бути більше 250Н [14]. Застосовуватимемо зусилля на випробуваний зразок 200Н. Для цього необхідно зробити розрахунок вантажу (рис.3.5.)

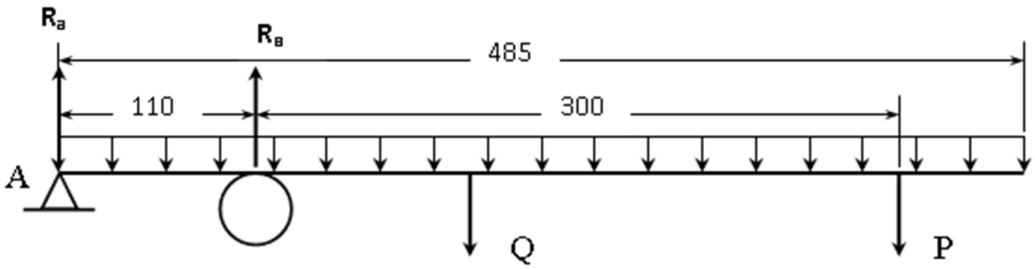


Рисунок 3.5 Схема навантаження зразка

Для розрахунку розподілене навантаження q замінюємо зосередженим та прикладеним у центрі. Знаючи питому вагу стали розміри прикладеного важеля розраховуємо Q

$$\sum M_A = R_B \cdot 10{,}0 - q \cdot 1{,}6 \cdot 3{,}5 \cdot 0{,}078 \cdot \frac{48{,}5}{2} - P \cdot 40 = 0$$

$$P = \frac{R_B \cdot 10 - Q \cdot 24{,}25}{40} = \frac{200 \cdot 10 - 21{,}2 \cdot 24{,}25}{40} = 37{,}1H$$

Для того, щоб забезпечити притиснення випробуваного зразка із зусиллям 200 Н необхідно докласти навантаження 37,1 Н.

3.3.1 Вибір методики випробування

Випробування проводилися за схемою "диск" - "колодка". Визначення геометричних показників зношування напиленого покриття виробляємо методом штучних баз.

В основі цього методу лежить ідея визначення кількісної величини лінійного зносу щодо зміни розмірів звужується поглиблення, зробленого на поверхні, що зноситься.

Штучна база створюється шляхом вдавлення алмазної піраміди, яка служить для вимірювання жорсткості за Віккерсом на приладі ТК-2.

Для визначення прийдешнього зносу випробуваний зразок ставимо в установку для випробування зносостійкості і вмикаємо її на 10-15 секунд.

Зразок є сталевою пластиною товщиною 6 мм. На поверхню зразка наноситься випробуване покриття. Розміри зразка 40 х 20 мм.

Після цього знімаємо зразок із установки. У місці контакту ролика із зразком має бути видно доріжку. Зразок встановлюємо на опорний столик твердоміра. З'єднуємо пунктирну лінію твердомірного окуляра із центром доріжки. Вдавлюємо в поверхню зразка діамантовий індентор і отримуємо відбиток на поверхні зразка. За зразком робимо чотири відбитки. Як індентор застосовуємо алмазну піраміду з квадратною основою і двогранним кутом при вершині рівним 136˚, рисунок 3.

У міру зношування поверхня відбитка буде зменшуватися, що дозволить визначити глибину виробітку. За допомогою барабанчика окуляр мікрометра вимірюємо довжини діагоналей кожного відбитка.

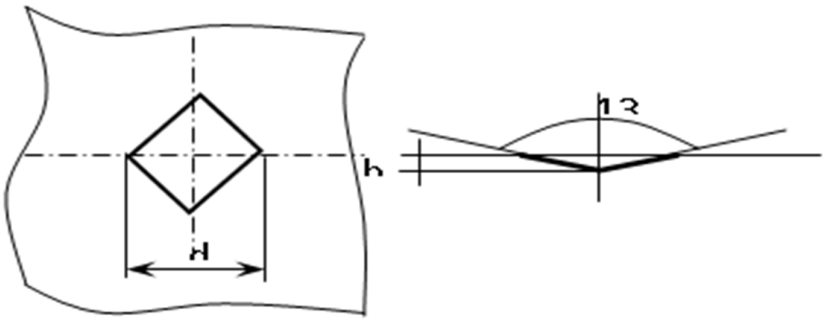
Величина зношування для відображення квадратної піраміди на поверхні покриття обчислюється за формулою:

$$\Delta h = h_1 - h_i = \frac{d_1 - d_i}{m}$$

де: h_1 і h_i глибина відбитка до і після випробування;

d_1 і d_i довжина діагоналі до і після випробування;

m - коефіцієнт пропорційності при α = 136º m = 7.



d-діагональ відбитка, *h*-глибина відбитка

Рисунок 3.6 Схема відбитка алмазної піраміди

Величину зносу при кожному наступному вимірі будемо визначати за формулою:

$$\Delta h = \frac{d_1 - d_i}{7}$$

Обсяг зносу напиляного покриття (за даними Ейхінгера) визначаємо за формулою:

$$V = \frac{I^3 \cdot b}{12 \cdot R}$$

де

b - довжина виробленої канавки, b = 12мм

R - радіус виробленої частини, R = 20 мм

I - ширина виробленої канавки;

$$I = 2\sqrt{R^2 - (R - \Delta h)^2}$$

3.3.2 Проведення випробування на зносостійкість

Випробування будемо проводити на плоских зразках розміром 40х20 мм. Зразок встановлюємо в випробувальну машину і включаємо на декількох- секунд і вимикаємо. На поверхні випробуваного покриття залишається канавка. За допомогою твердоміра ТК-2 на доріжці у трьох місцях наносимо індентором відбитки. Потім встановлюємо зразок в випробувальну машину і включаємо на перший інтервал часу. По закінченню 10 с машина відключається. Зразок встановлюється на предметний столик мікроскопа і замірюється діагональ відбитка в двох взаємно перпендикулярних площинках. Заміривши, діагональ на трьох відбитках, визначаємо середнє значення. Зробимо розрахунок обсягу зносу на персональному комп'ютері в електронних таблицях EXCEL [15]. Результати випробувань зводимо в таблицю 4.

Час, хв	d-діагональ відбитка, мкм						dср-діагональ відбитка, мкм	h-глибина зносу, мкм	l-ширина канавки, мм	V-об'єм зносу, мм^3
	1		2		3					
	г	в	г	в	г	в				
ПГ-10Н-01										
0	819	821	785	808	772	774	797	0	0,0000	0
10	809	815	760	780	748	760	779	2,55	0,7841	0,0241
20	806	812	756	772	752	756	776	2,98	0,8946	0,0358
30	802	808	733	770	735	751	767	4,29	0,9641	0,0448
45	800	802	722	760	726	746	759	5,31	1,0531	0,0584
60	792	796	720	752	720	740	753	6,17	1,1085	0,0681
90	789	791	717	750	718	740	751	6,52	1,1783	0,0818
120	772	786	691	694	713	735	732	9,24	1,2133	0,0893
150	770	780	687	691	712	732	729	9,69	1,2364	0,0945
ПГ-12Н-02										
0	722	740	713	742	761	763	740	0	0,0000	0
10	680	689	685	687	707	714	694	6,64	1,0585	0,0593
20	676	680	667	669	687	688	678	8,9	1,2519	0,0981
30	670	675	663	665	666	683	670	9,98	1,3722	0,1292
45	668	670	660	662	662	675	666	10,57	1,4296	0,1461
60	662	668	661	663	664	669	665	10,81	1,4619	0,1562
90	659	665	658	660	664	666	662	11,17	1,5220	0,1763
120	654	656	653	655	659	661	656	11,98	1,5676	0,1926
150	663	655	652	654	658	660	657	11,88	1,5738	0,1949

Час, хв	d-діагональ відбитка, мкм						dср-діагональ відбитка, мкм	h-глибина зносу, мкм	l-ширина канавки, мм	V-об'єм зносу, мм^3
	1		2		3					
	г	в	г	в	г	в				
ПГ-12Н-01										
0	736	741	672	682	700	728	710	0	0,0000	0
10	703	713	566	588	673	699	657	7,55	1,1287	0,0719
20	694	728	560	562	630	682	643	9,6	1,2724	0,103
30	679	715	564	594	637	741	655	7,83	1,3238	0,116
45	674	700	561	573	632	738	646	9,07	1,3845	0,1327
60	671	697	540	554	651	733	641	9,83	1,4322	0,1469
90	664	684	535	537	642	698	627	11,88	1,4794	0,1619
120	642	646	527	529	640	676	610	14,26	1,5229	0,1766
150	631	641	522	526	605	650	596	16,29	1,5402	0,1827
ПГ-12Н-04										
0	1071	1119	1023	1065	1044	1056	1063	0	0,0000	0
10	956	986	971	982	1013	1051	993	9,98	1,3722	0,1292
20	929	961	935	989	1008	1038	977	12,33	1,5329	0,1801
30	901	933	907	985	985	1031	957	15,14	1,5984	0,2042
45	892	924	904	930	952	978	930	19	1,6796	0,2369
60	883	909	887	925	935	961	917	20,9	1,7282	0,2581
90	829	865	834	890	880	916	869	27,71	1,8278	0,3053
120	796	896	827	879	865	903	861	28,86	1,8697	0,3268
150	775	827	815	861	822	880	830	33,29	1,9218	0,3549

За отриманими результатами будуємо графічні залежності обсягу зносу від часу випробування, рисунок 3.7.

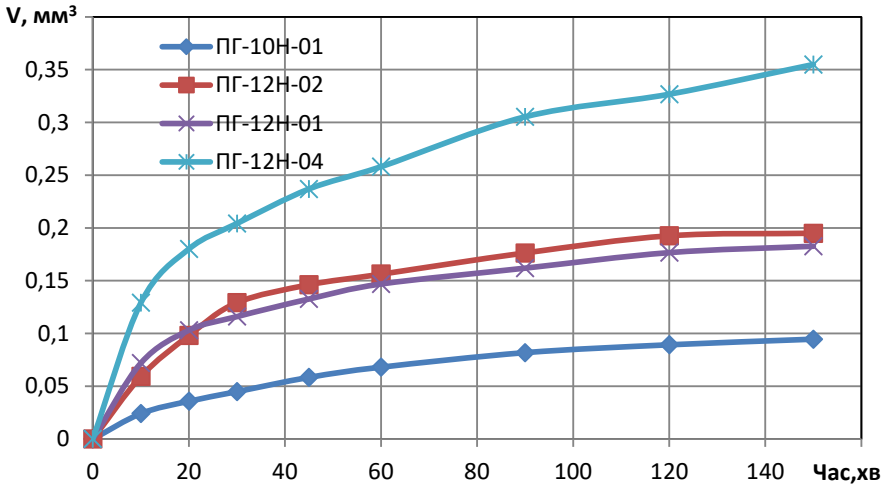


Рисунок 3.7 Результати випробувань

Мінімальний об'єм зношеного матеріалу зафіксований при випробуваннях покриттів, напилених з одночасним оплавленням (ПГ-10Н-01). Таким чином, можна відзначити, що підвищення мікротвердості сприяє зниженню зношування покриттів даного складу в реалізованих умовах тертя ковзання.

Висновки

Для відновлення валу вибрано самофлюсуючий порошковий сплав з одночасним оплавленням ПГ-10Н-01. Даний сплав має добру міцність зчеплення з основою 418 мПа та найбільшу твердість, порядку HRC 60.

Дане значення твердості підтвердило, що чим більша твердість тим кращі антифрикційні властивості.

					МР 132.6121м.07.04.04. ПЗ		
Змін.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дата			
Студент		Стефурак Д.П..			Загальні висновки по дип-ломній роботі	Літ.	Арк. 79 / Аркушів 5
Консультант							
Керівник		Спіхтаренко В.				ХННІ НУК	
Н. Контр.							
Зав.кафедр.		Матвієнко М.В.					

У результаті аналізу можливих технологічних варіантів відновлення деталей типу вал був обраний спосіб плазмового наплавлення порошковими матеріалами, що забезпечують необхідну якість нанесеного покриття.

1 Для підвищення міцності зчеплення покриття з робочою поверхнею була розроблена технологія плазмового напилення з одночасним оплавленням. В якості устаткування запропоновано установку для плазмового напилення УПУ-3Д з плазмотроном ПП-25.

2 У якості матеріалу вибрано самофлюсуючий порошок ПГ-10Н-01 (порошок – аналог «Боротак» - сфероідізований порошок сплаву на нікелевій основі системи Ni-Cr-B-Si-C-Fe. Фракція 40-100 мкм.

3 Проведено розрахунок ККД плазмотрона. Визначено, що при витратах плазмоутворюючого газу (Ar) 0,45г/с (15л/хв) ККД дорівнюється 0,5.

4 Розрахунок теплової потужності плазмотрону показав, що для відновлення поверхні при розрахованих параметрах достатньо 10-12 кВт.

5 При напиленні на поверхню низьколегованих сталей під дією термодеформаційного циклу можливе утворення гартівної структури, що може викликати утворення холодних тріщин. Проведений розрахунок термічного циклу дозволив розрахувати температуру підігріву та знизити кількість мартенситної складової до 50% при температурі підігріву Т≈300°С, що допустимо при відновленні.

6. Для отримання якісного зчеплення покриття з основою необхідно проводити попереднє нагрівання деталі до температури 200-300°С з відстані 100-125 мм, здійснюючи зворотно-поступальне переміщення факелу пальника по всій поверхні. Нанести шар покриття. Після цього підвести сопло пальника до поверхні деталі на відстань 60 мм та продовжувати нагрів, здійснюючи невеликі коливальні рухи до з’явлення «дзеркального блиску) поверхні, що свідчить про закінчення процесу оплавлення.

7. Необхідно уникати перегріву покриття. Це призведе до підтоків та різкому зниженню фізико-механічних властивостей покриття.

8 Дослідження міцності зчеплення покриття з основою показали достатню міцність у всіх покриттів. Найбільша міцність у покриття сплаву ПГ-10Н-01.

9 Механічні випробування напилених покриттів (зносостійкість, твердість) дозволили підтвердити факт, що чим твердіше покриття, тим менший знос матеріалу.

10 Контроль за зовнішнім виглядом здійснюється з метою виявлення зовнішніх дефектів – зколів, вздутості, відслоєння здійснюється з використанням лупи десятикратного збільшення типів ЛИ-3, ЛИ-4 по ГОСТ 8309-75, ГОСТ 2594-75 при достатньому освітленні.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 768 с

2. Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин [Текст] / Под редакцией В.С. Попова. - Запорожье: Издательство ОАО "Мотор Сич", 2000. - 394 с.

3 Gómez-del Río T. et al. Influence of the deposition techniques on the mechanical properties and microstructure of NiCrBSi coatings // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 204, Is. 1-3. – P. 304-312.

4 Simunovic K., Saric T., Simunovic G. Different Approaches to the Investigation and Testing of the Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings - A Review. Part 1: General Facts, Wear and Corrosion Investigations // Tribology Transactions. - 2014. - Vol. 57, Iss. 6. – P. 955-979.

5 Zimogliadova T.A., Bataev A.A., Lazurenko D.V., Bataev I.A., Bataev V.A., Golkovskii M.G. and others. Structural characterization of layers fabricated by non- vacuum electron beam cladding of Ni-Cr-Si-B self-fluxing alloy with additions of niobium and boron // Materials today communications. - 2022. - Vol. 33. - P. 1-10.

6 Dong X.Y., Luo X.T., Zhang S.L. et al. A Novel Strategy for Depositing Dense Self-fluxing Alloy Coatings with Sufficiently Bonded Splats by One-Step Atmospheric Plasma Spraying // J Therm Spray Tech. 29 (2020). – P. 173–184. https://doi.org/10.1007/s11666-019-00943-4.

7 Simunovic K., Havrlisan S., Saric T., Vukelic D. Modeling and Optimization in Investigating Thermally Sprayed Ni-Based Self-Fluxing Alloy Coatings: A Review // Materials. – 2020. – 13 (20). – P. 4584. https://doi.org/10.3390/ma13204584.

8 G. Xu, M. Kutsuna, Z. Liu, H. Zhang. Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding processes // Materials Science and Engineering: A. – 2006. – Vol. 417. – P. 63-72.

9 G. Xu, M. Kutsuna, Z. Liu. CO2 laser cladding and plasma cladding of Ni-based alloy powder on the SUS316LN stainless steel // JSME International Journal: C. – 2006. – Vol. 49, Is. 2. – P. 370-378.

10 Joseph R. Davis. Handbook of Thermal Spray Technology. - ASM International, 1 янв. 2004 г. – 338 p.

11. Голобородько, Ж.Г. Автоматическая дуговая сварка в судостроении [Текст] / Ж.Г. Голобородько. – Херсон: ООО и «ПКФ «Старт» ЛТД», 2011. – 233 с.

12. Прайс-лист концерну «Агро-Союз». Дніпропетровськ, Агро-Союз, 2010, 22 с.

13. Астахов Є.А. Науково-технологічні основи керування властивостями детонаційних покриттів [Текст] / Автореф. дис. .докт. техн. наук. - К.: ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ. - 2005. - 36 с.

14. Триботехнология судового машиностроени: Сборник научных трудов. - Николаев: НКИ. 1990. 83с.

15. Спіхтаренко В.В. Використання персонального комп'ютера в інженерних розрахунках: Навчальний посібник [Текст] / В.В. Спіхтаренко. – Херсон: Олді-плюс, 2007. – 284 с.

					МР 132.6121м.07.00.04.ПЗ		
Змін.	Арк.	№ документа.	Підпис	Дата			
Студент		Стефурак Д.П..			Додатки	Літ.	Арк. 84 / Аркушів 2
Консультант							
Керівник		Спіхтаренко В.				ХННІ НУК	
Н. Контр.							
Зав.кафедр.		Матвієнко М.В.					