

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання практичних занять з курсу

«Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення  
деталей»

для студентів спеціальності 131. «Прикладна механіка»  
денної і заочної форми навчання

Затверджено  
на засіданні кафедри зварювання  
Протокол № 12 від 30.06.2023

Харків  
НТУ "ХПІ"  
2023

Методичні вказівки до виконання практичних занять з курсу «Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей» для студентів спеціальності 131. «Прикладна механіка» денної і заочної форми навчання / уклад.: С. О. Лузан. – Харків : НТУ «ХП», 2023. – 42 с.

Укладач: С. О. Лузан

Рецензент Б.В. Сітніков

Кафедра зварювання

## Зміст

<b>Вступ</b> .....	4
<b>Практичне заняття № 1</b>	
Визначення товщини відновлювального покриття і припусків на механічну обробку .....	5
<b>Практичне заняття № 2</b>	
Відновлення гільз циліндрів плазмовим напиленням, інтегрованим з щіткової обробкою.....	10
<b>Практичне заняття № 3</b>	
Визначення оптимальної області параметрів режиму плазмового наплавлення чавуну.....	17
<b>Практичне заняття № 4</b>	
Високошвидкісне газополуменеве напилення покриттів.....	23
<b>Практичне заняття № 5</b>	
Відновлення деталей холодним газодинамічним напиленням.....	29
<b>Практичне заняття № 6</b>	
Дослідження матеріалів з покриттями на короткочасну міцність.....	35
<b>Практичне заняття № 7</b>	
Оцінка якості напилення шляхом статичного випробування композиційних матеріалів на згинання.....	39

## Вступ

Підвищення і забезпечення надійності засобів транспорту є однією з найважливіших передумов їх ефективного використання. Основна властивість, яке характеризує надійність засобів транспорту, – довговічність визначається показниками термін служби і ресурс. На даний момент ряд засобів транспорту, що експлуатуються в різних областях промисловості, мають недостатній термін служби, що призводить до величезних збитків. Внаслідок тертя і зношування в машинобудуванні матеріальні втрати розвинених держав досягають 4-5% національного доходу. Опір тертя поглинає в усьому світі 30-40% вироблюваної енергії. Витрати на ремонт і технічне обслуговування машин найчастіше в кілька разів перевищують їх вартість.

Мета дисципліни «Обґрунтування та вдосконалення технологій відновлення деталей» навчити студентів застосовувати на практиці комплексний підхід при виборі найбільш раціонального способу вдосконалення методу відновлення деталей машин.

Дані методичні вказівки присвячені для надання методичної допомоги при виконанні практичних занять, рекомендованих програмою дисципліни.

Розраховані для студентів, які навчаються за спеціальністю 131. «Прикладна механіка».

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1

### ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ І ПРИПУСКІВ НА МЕХАНІЧНУ ОБРОБКУ

**Мета заняття:** ознайомлення студентів з характерними етапами відновлення деталей і набуття практичних навичок щодо застосування методики розрахунку товщини покриття і припусків на механічну обробку.

#### Загальні положення

Поверхневий шар деталі, що знаходиться під впливом зовнішнього середовища і навантажень і в подальшому проходить етапи відновлення, неодноразово змінюється по товщині і структурі. Знання про вихідний, проміжному і остаточному стані поверхні деталі і її поверхневого шару дозволяє формувати необхідні властивості поверхні цієї деталі в процесі відновлення, також проектувати технологічний процес відновлення з урахуванням умов її експлуатації.

Для всіх типів покриттів важливе значення має його товщина. Вибір товщини в основному визначається умовами експлуатації зміцнюваного виробу або величиною зносу відновлюваної деталі. Товщина покриття повинна забезпечити заданий ресурс і відновлення номінального розміру деталі.

Для вирішення технологічних задач, пов'язаних з розрахунком розмірів наносяться шарів при відновленні, розроблена узагальнена схема поверхневого шару (рис. 1.1) за допомогою якої можна виконувати ряд технологічних розрахунків: призначення величини наносяться і видаляються поверхневих шарів, обґрунтування кожного шару в багатшаровому поверхневому покритті, раціональне використання дорогих наносяться матеріалів, вибір методів і засобів контролю деталей і параметрів поверхневого шару матеріалу.

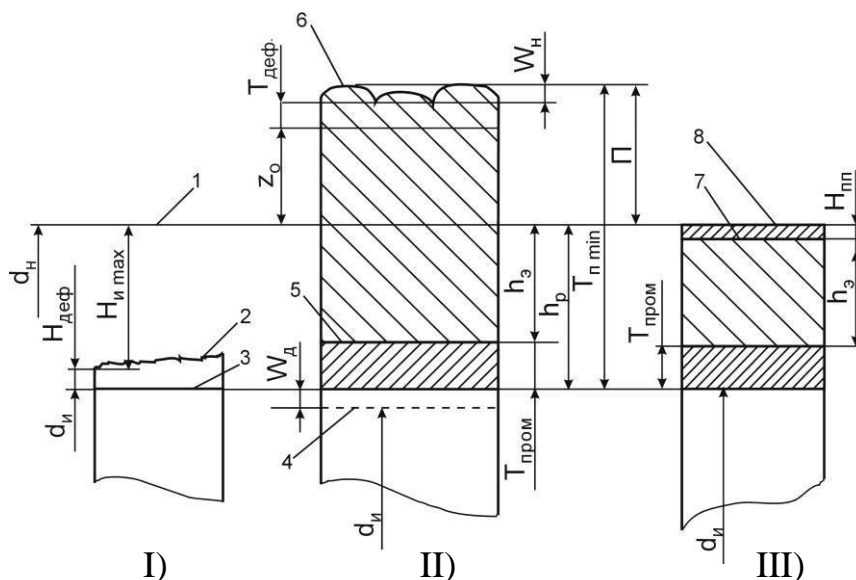


Рисунок 1.1. Схема поверхневого шару деталі і етапи її відновлення:  
 I – підготовка під нанесення покриття; II – нанесення покриття (шару);  
 III – обробка покриття і нанесення захисного або прірабочого покриття.  
 Поверхні: 1 – вихідна нової деталі; 2 – зношеної деталі; 3 – після підготовки (механічної обробки) під нанесення покриття;

4 – становище поверхні 3 після наплавлення в результаті деформації деталі; 5 – після нанесення проміжного шару; 6 – після нанесення основного (робочого) шару; 7 – після механічної обробки; 8 – після нанесення захисного або прірабочного покриття

Схема відображає найбільш характерні етапи відновлення: видалення дефектного шару зношеної деталі і відхилень форми поверхні під нанесення нового поверхневого шару, нанесення покриття та його механічну обробку, нанесення прірабочного покриття. Позначення розмірів і характеристик поверхневих шарів, зазначених на рис. 1.1 і в наступних залежностях, наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Параметри поверхневого шару деталей при відновленні і зміцненні

Найменування параметра поверхневого шару	Позначення
1. Підготовка під нанесення шару або покриття	
Номінальний розмір деталі *	$D_n, d_n$
Максимальна величина зносу (максимальна товщина шару, втраченого при зношуванні)	$H_{n \max}$
Глибина дефектного поверхневого шару зношеної деталі	$H_{\text{деф}}$
Початковий розмір деталі після механічної обробки під нанесення шар	$D_n, d_n$
2. Нанесення проміжного шару або покриття	
Мінімальна товщина зміцнюючого покриття, шару	$T_{\text{п min}}$
Товщина проміжного шару	$T_{\text{пром}}$
Глибина дефектного шару, сформована при нанесенні покриття, термообробці або оплавленні напиляного шару	$T_{\text{деф}}$
Товщина перехідного шару між матеріалом деталі і нанесеного шару	$T_{\text{пер}}$
Величина нерівностей нанесеного шару, включаючи напливи, западини, шлакові включення та інші дефекти поверхні	$W_n$
Величина просторового відхилення розташування поверхні в наслідок деформації деталі, що виникає в процесі нанесення покриття	$W_d$
Величина зміни товщини напиляного покриття ( $T_{\text{п min}}$ ) в результаті його оплавлення	$\Delta T_{\text{п}}$
3. Розмірна обробка після нанесення шару або покриття	
Товщина нанесеного шару після розмірної обробки	$h_p$
Товщина шару, що забезпечує необхідний ресурс деталі	$h_e$
Товщина шару, знятого при механічній обробці похибка установки	$\Pi$
Похибка установки	$\varepsilon_i$
4. Нанесення прірабочного шару і поверхневе зміцнення	
Товщина покриття	$H_{\text{пп}}$
Глибина зміцненого шару	$H_y$

Примітка . \* –  $D_n$ , номінальний розмір отвору;  $d_n$  – номінальний розмір вала.

Якщо покриття наноситься з метою надання поверхні, що захищається одного або декількох спеціальних властивостей (наприклад, жароміцності і зносостійкості), то товщина шару  $h_e$  повинна задовольняти необхідним вимогам. Товщина шару

покриття при зношуванні  $h_e$ , що забезпечує необхідний ресурс роботи виробу. У більшості випадків залежність між ресурсом і величиною зносу лінійна. тоді

$$h_e = kv_{cp}t_p \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт запасу довговічності ( $k = 1,2-1,5$ ), враховує розкид значень зносостійкості матеріалу покриття, умов експлуатації і величину зносу при заробляння;  $v_{cp}$  – середня швидкість зношування покриття, мм/тис. год;  $t_p$  – потрібний або заданий ресурс. При цьому товщина зносостійкого покриття повинна бути не менше граничної величини зносу для даної деталі ( $h_e \geq H_{и\text{ пред}}$ ).

Часто покриття за умовами експлуатації або технології наносять на подслої або роблять багат шаровими, т. е. покриття складається з основного робочого шару  $h_e$  і підшару або прошарку  $T_{\text{пром}}$ . При відновленні зношених виробів часто товщина покриття визначається величиною зносу. У разі відновлення деталей з великим зносом ( $H_{и\text{ max}} \gg h_e$ ) і застосування зносостійкого покриття, що має обмеження по товщині шару, що наноситься або високу вартість, наносять проміжний шар  $T_{\text{пром}}$  більш дешевого матеріалу. Тому мінімальна товщина покриття буде

$$h_{p\text{ min}} = h_e + T_{\text{пром}} \quad (2)$$

При наплавленні покриттів, напиленні з наступним або одночасним оплавленням на порожні деталі (втулки, поршні і т. д.) Спостерігається зменшення їх розміру в місці нанесення шару внаслідок деформацій на величину  $W_d$ , яка визначається експериментально. Мінімальна робоча товщина покриття з урахуванням проміжних шарів деформацій записується вираженням (рис. 1)

$$h_{p\text{ min}} = h_e + T_{\text{пром}} + W_d;$$

2) мінімальний загальний припуск на обробку покриття при  $n$  операційних переходах ( $\Pi$ )

$$\Pi = Z_{o\text{ min}} + \varepsilon_i + T_{\text{деф}} + W_H \quad (3)$$

де  $Z_{o\text{ min}} = \sum_{i=1}^n Z_{i\text{ min}}$  – загальний припуск на механічну обробку.

Розрахункова формула для визначення припуску на першій операції обробки покриття має вигляд

$$Z_{1\text{ min}} = (Rz_0 + H_0) + T_{\text{деф}} + W_H + \varepsilon_1$$

де  $Rz_0$  і  $H_0$  – відповідно висота мікронерівностей і глибина дефектного шару покриття після нанесення;  $T_{\text{деф}}$  і  $W_H$  – розшифровка позначень наведено в табл. 1.4;  $\varepsilon_1$  – похибка установки на першій операції обробки покриття.

Мінімальна товщина покриття визначається за формулою

$$T_{n\text{ min}} = h_{p\text{ min}} + \Pi_{\text{min}} + W_d = h_{p\text{ min}} + Z_{o\text{ min}} + \varepsilon_i + T_{\text{деф}} + W_H + W_d$$

Щоб уникнути браку при розмірній обробці деталей, що виготовляються з нанесенням покриття методами газотермічного напилення з наступним його опалювальному, слід враховувати зміну товщини напилених і оплавлених покриттів - розміри попередньо напилених деталей (заготовок) слід завищувати (або занижувати - для внутрішніх поверхонь) на величину просторової усадки (в середньому на 15 – 20%) і відповідно збільшувати товщину шару, що наноситься на  $T = (0,15-0,20) T_{n \min}$ . Для таких покриттів мінімальна товщина покриття визначається за формулою

$$T_{n \min} = h_{p \min} + \Pi_{\min} + W_{\text{д}} + \Delta T \quad (4)$$

Товщина покриття – поняття, що відноситься до певної оброблюваної поверхні, вимірюють її по нормалі до цієї поверхні. Коливання розмірів, одержуваних на кожному ступені обробки, зумовлюють зміни товщини покриття, номінальної товщини, найбільшої товщини, найменшою товщини і середньої товщини.

Необхідна глибина зміцненого шару  $H_y$  розраховується виходячи з умов експлуатації та необхідного ресурсу деталі, а визначається на зразках при виборі оптимальних параметрів режиму зміцнення, що забезпечують необхідну глибину зміцнення.

Після розрахунку товщини покриття, що наноситься вибирається метод його нанесення. Найбільш поширені методи нанесення поверхневого шару, що застосовуються при відновленні деталей, наведені в додатку А табл. П1.

### Порядок виконання роботи і зміст звіту

Кожен студент після ознайомлення з методичними вказівками виробляє товщини покриття і припусків на механічну обробку відповідно до власного варіантом вихідних даних, отриманих від викладача (представлені в табл. 1.2). За результатами розрахунку будується схема поверхневого шару деталі і проводяться необхідні уточнення.

1. Спочатку розраховується товщина шару, що забезпечує необхідний ресурс деталі по формулі 1.

2. У разі відновлення деталей з великим зносом ( $H_{\text{и max}} \gg h_{\text{э}}$ ) розраховують величину проміжного шару  $T$  пром за формулою 2.

3. Потім розраховується мінімальна робоча товщина покриття за формулою 2.

4. Потім в залежності від отриманої мінімальної робочої товщини покриття вибирається метод його нанесення по табл. П1. Припуск на механічну обробку розраховується за формулою 3 або визначається по табл. П1.

5. Уточнюється мінімальна товщина покриття за формулою 4.

6. За отриманими даними будується схема поверхневого шару деталі і проводяться необхідні уточнення.



Таблиця 1.2 - Варіанти завдання

№ варіанта	Тип деталі	Максимальна величина зносу, мм	Середня швидкість зношування, мм/тис. год.	Заданий ресурс, тис. год.	Величина просторового відхилення розташування, мм
1	2	3	4	5	6
1	Вал	0,05	0,003	15	0
2	Вал	0,20	0,004	15	0
3	Вал	0,50	0,005	20	0
4	Вал	0,90	0,006	20	0
5	Вал	1,50	0,070	25	0
6	Вал	1,80	0,070	25	0
7	Вал	2,50	0,080	30	0
8	Вал	3,50	0,080	30	0
9	Втулка	0,05	0,003	15	0,1
10	Втулка	0,20	0,004	15	0,05
11	Втулка	0,50	0,005	20	0,05
12	Втулка	0,80	0,006	20	0,20
13	Втулка	1,20	0,010	25	0,10
14	Втулка	1,50	0,012	25	0,15
15	Втулка	2,00	0,080	30	0,25
16	Втулка	3,00	0,080	30	0,30

### Контрольні питання

1. Якими параметрами визначається мінімальна робоча товщина покриття?
2. Якими параметрами визначається товщина шару, що забезпечує необхідний ресурс деталі?
3. Назвіть причини просторового відхилення розташування поверхні при відновленні деталей зварюванням і наплавленням.
4. Чому змінюється товщина напиляного шару після його оплавлення?
5. З яких параметрів складається припуск на першій операції обробки покриття?
6. Назвіть основні етапи розрахунку мінімальної товщини покриття, що наноситься за викладеною методикою.
7. У чому переваги і недоліки запропонованої методики?

### Рекомендована література

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – К. : Наукова думка, 1987. – 544 с.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

### ВІДНОВЛЕННЯ ГІЛЬЗ ЦИЛІНДРІВ ПЛАЗМОВИМ НАПИЛЕННЯМ, ІНТЕГРОВАНИМ З ЩІТКОВОЇ ОБРОБКОЮ

**Мета заняття:** ознайомлення студентів з причинами зносу поверхонь втулок циліндрів і набуття практичних навичок з розробки технологічного процесу відновлення і зміцнення методом плазмового напилення.

#### Загальні положення

Відмови втулок циліндрів відбуваються в результаті зносу внутрішніх поверхонь внаслідок тертя з поверхнею поршневих кілець і тронка поршня, корозії в результаті попадання води, сірчистих сполук і сполук ванадію з палива та масла, високою теплонапряженности.

Для відновлення і зміцнення втулок циліндрів застосовуються різні способи (наприклад, хромування), однак найбільш перспективним методом є плазмового напилення. Процес плазмового напилення характеризується можливістю створювати на поверхні деталі шари з необхідними фізико-механічними і триботехнічними властивостями.

Плазмове покриття при відповідному підборі матеріалу і устаткування для його нанесення може підвищити зносостійкість деталі, запобігти ерозії, знизити швидкість зношування поверхні при роботі з кільцями з різних матеріалів, зменшити ймовірність утворення тріщин.

Особливості плазмового процесу. Плазмовий струмінь являє собою іонізований, високотемпературний і високошвидкісний потік газу.

Температура струменя коливається від 5000 до 20000<sup>0</sup>С (в плазмотронах, що застосовуються для відновлення або зміцнення поверхонь деталей).

У плазмову струмінь вводиться порошок або дріт. Введені в струмінь матеріали розплавляються, розганяються і з велику кінетичну енергію вдаряються і приварюються до поверхні деталі.

Устаткування. Для відновлення гільзи циліндра методом плазмового напилення ділянка повинна бути укомплектований наступним устаткуванням: обертач (можливе застосування токарного верстата) або спеціальної камери з обертач, джерелом живлення, живильниками для подачі порошку або механізмом подачі дроту, плазмотроном, камери для абразивно-струминної обробки, агрегатів для подачі води і повітря, балонів з інертними газами. Схема процесу плазмового напилення внутрішньої поверхні гільзи циліндра двигуна внутрішнього згорання наведена на рис. 2.1. Гільзу циліндра 4 за допомогою спеціальної оправлення 3 кріплять в планшайбе 2 токарного верстата 1. Переміщення плазмотрона 5 здійснюється за допомогою супорта верстата 6. Використаний плазмообразуючий газ і пилоподібні частки порошку видаляються через наявні в оправці вікна. Для підготовки поверхні перед напиленням застосовується щеточная обробка, яка проводиться безпосередньо перед напиленням покриття на тому ж обертачі (рис. 2.2). Така інтеграція щеточної обробки і процесу нанесення покриття дозволяє максимально скоротити час між підготовкою поверхні і напиленням покриття.

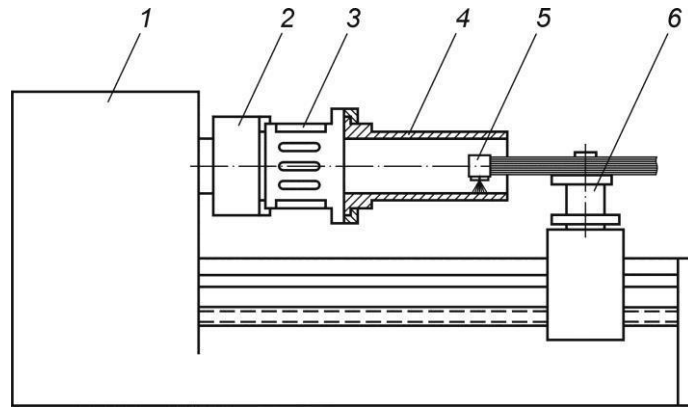


Рисунок 2.1 – Схема плазмового наплення внутрішньої поверхні гільзи циліндра

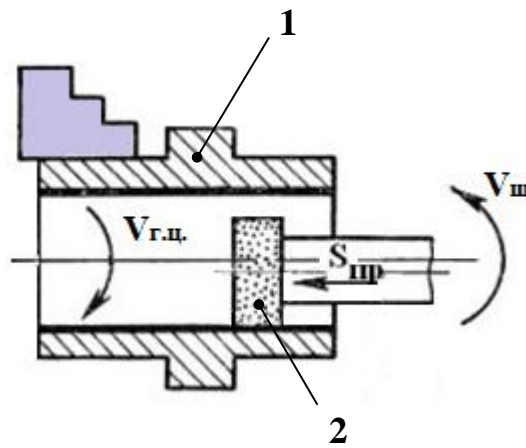


Рисунок 2.2 – Схема щеточної обробки напильної поверхні:  
1 – гільза циліндра; 2 - металева щітка

Плазмотрон складається з корпусу, катодного та анодного вузлів, сопла, порожнин для водяного охолодження, елементів для підведення електричної енергії та плазмообразуючого газу. При роботі на інертних газах для виготовлення катода застосовується лантанований вольфрам. При використанні плазмообразуючого газу повітря – катодом є мідь з гафнієвої вставкою.

### Настанови щодо вибору матеріалів та обладнання для наплення.

Матеріали для наплення вибираються в залежності від умов роботи втулки, що залежать від експлуатаційних характеристик двигуна, матеріалу поршневих кілець, температурних характеристик робочої поверхні втулки в процесі роботи двигуна, складу палива і масла. Обладнання: джерело живлення і плазмотрон також вибирається залежно від умов роботи втулки і необхідних параметрів поверхневого шару.

### Технологія відновлення гільз циліндра

1. Підготовка матеріалів. Підготовка порошкових матеріалів полягає в сушінні і поділі по грануляції.
2. Підготовка гільзи циліндра до напильовання.

2.1. Очищення гільзи циліндра від бруду, слідів корозії та масла проводиться механічним і хімічним шляхом. Після очищення гільзу циліндра необхідно промити розчином каустичної соди і зробити сушку при температурі 80<sup>0</sup> С.

2.2. Дефектація гільзи циліндра. Контроль відхилення від циліндричної і величину зносу втулки виробляють за допомогою індикаторного або мікрометричного нутромера. Контроль на наявність тріщин виробляють методом ультразвукової дефектоскопії. При наявності підповерхневих тріщин гільза циліндра відновленню не підлягає.

2.3. Попередня механічна (токарна) обробка проводиться для усунення відхилень форми внутрішньої поверхні гільзи циліндра і дефектного шару.

2.4. Абразивно-струменевий обробка поверхні втулки проводиться електрокорунду зернистістю 1,0-1,2 мм. Час від моменту закінчення абразивно-струминної обробки до напилення не повинно перевищувати 3 год.

### 3. Нанесення покриття.

3.1. Закріпити гільзу циліндра в пристосуванні для відводу газів згідно рис. 4.

3.2. Встановити плазмотрон і зробити напилення в відповідно до режимів, згідно з даними табл. 2.1. Спочатку наносять 1-2 шари порошком ПТЮ5Н, використовуючи плазмообразующий газ аргон на режимі, наведеному в табл. 2.1. Потім необхідну кількість шарів зносостійкого матеріалу (табл. 2.2) для забезпечення необхідної товщини покриття, але не більше 1 мм без урахування припуску на механічну обробку.

3.3. Товщину напиляного шару контролюють за допомогою приладу МТС-3, залишаючи припуск на механічну обробку 0,1-0,15 мм.

Таблиця 2.1 – Параметри режиму напилення

Марка присадочного матеріалу	Плазмо утворюючий газ	Напруга на дузі, В	Струм, А	Витрата плазмо утворюючого газу, л/хв	Швидкість обертання гільзи циліндра, об/хв
ПТЮ5Н	Ar + 10%N <sub>2</sub>	60	200	50	20
ПН85Ю15+ 20% TiN	Ar + 10%N <sub>2</sub>	75	350	50	20
	повітря	220	150	50	20
ПН85Ю15+ 20% ZrO <sub>2</sub>	Ar + 10%N <sub>2</sub>	75	400	50	20
	повітря	320	200	50	20
ПГ-СР4	Ar + 10%N <sub>2</sub>	90	400	50	20
	повітря	320	300	50	20

**Механічна обробка.** Механічна обробка внутрішньої поверхні гільзи циліндра здійснюється на внутрішньошліфувальних і хонінгувальному верстатах.

При нерівномірності напиляного шару по висоті гільзи циліндра в межах 0,1 мм і вище попередня обробка проводиться на внутрішньошліфувальних верстатах із застосуванням шліфувальних кругів марки 12 СМ18К 10. Швидкість обертання кола 30 м / хв. Швидкість обертання гільзи циліндра 100 хв<sup>-1</sup>, глибина різання 0,03 мм. Хонингование проводиться із застосуванням алмазних брусків марки АЕ 17 зі зняттям шару за один прохід 0,005 мм.

4. Контроль якості напиляного покриття. Контроль якості включає: зовнішній огляд покриття; контроль товщини покриття методом вимірювань; контроль на відсутність відколів, тріщин, відшарування методом ультразвукової дефектоскопії.

## Порядок виконання роботи

Кожен студент після ознайомлення з методичними вказівками здійснює проектування технології відновлення гільзи циліндра відповідно до власного варіантом вихідних даних, отриманих від викладача (представлені в табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Варіанти завдань

№ варіанту	Діаметр гільзи циліндра, мм	Висота гільзи циліндра, мм	Величина зносу гільзи циліндра по діаметру, мм	Марка плазмотрона	Матеріал покриття гільзи циліндра
1	160	250	0.4	ПП25	-
2	200	380	0.6	С2В3	-
3	240	420	0.8	АПРН	-
4	300	560	1.0	ПП25	-
5	320	850	1.2	С2В3	-
6	400	1200	1.5	АПРН	-
7	500	1600	1.4	С2В3	-
8	160	250	0.4	-	ПН85Ю15+20%TiN
9	200	380	0.6	-	ПГ-СР4
10	240	420	0.8	-	ПН85Ю15+20%ZrO <sub>2</sub>
11	300	560	1.0	-	ПН85Ю15+25% TiN
12	320	850	1.2	-	ПГ-СР4
13	400	1200	1.5	-	ПН85Ю15+20% ZrO <sub>2</sub>
14	500	1600	1.4	-	ПН85Ю15+20% TiN
15	620	2200	1.6	-	ПН85Ю15+20% ZrO <sub>2</sub>

1. Відповідно до варіанту вихідних даних вибрати по табл. 2.3 матеріал для відновлення гільзи циліндра з урахуванням забезпечення максимальної довговічності сполучення «втулка - поршневі кільця» і мінімальної температури на поверхні тертя:

– марку плазмотрона, матеріал кільця і зміцнюючу технологію (для варіантів 1-7);

– матеріал покриття гільзи циліндра, матеріал кільця і зміцнюючу технологію (для варіантів 8-15).

2. Вибрати по табл. 2.1 параметри режиму напилення для відповідного покриття.

3. Скласти план технологічних операцій.

4. Визначити припуск на механічну обробку і намалювати ескіз гільзи циліндра з нанесеним покриттям з урахуванням припуску на механічну обробку.

5. Вибрати режими механічної обробки покриття.

6. Розрахувати час нанесення проміжного і основного покриттів виходячи з того, що за один прохід наноситься шар товщиною 0,05-0,06 мм, продуктивність напилення 4 кг / год.

7. Розрахувати час механічної обробки.

Таблиця 2.2 – Варіанти завдань

№ варіанту	Діаметр гільзи циліндра, мм	Висота гільзи циліндра, мм	Величина зносу гільзи циліндра по діаметру, мм	Марка плазмотрона	Матеріал покриття гільзи циліндра
1	160	250	0.4	ПП25	-
2	200	380	0.6	С2В3	-
3	240	420	0.8	АПРН	-
4	300	560	1.0	ПП25	-
5	320	850	1.2	С2В3	-
6	400	1200	1.5	АПРН	-
7	500	1600	1.4	С2В3	-
8	160	250	0.4	-	ПН85Ю15+20%TiN
9	200	380	0.6	-	ПГ-СР4
10	240	420	0.8	-	ПН85Ю15+20%ZrO <sub>2</sub>
11	300	560	1.0	-	ПН85Ю15+25% TiN
12	320	850	1.2	-	ПГ-СР4
13	400	1200	1.5	-	ПН85Ю15+20% ZrO <sub>2</sub>
14	500	1600	1.4	-	ПН85Ю15+20% TiN
15	620	2200	1.6	-	ПН85Ю15+20% ZrO <sub>2</sub>

### Зміст звіту

1. Обґрунтування вибору марки плазмотрона, матеріал кільця і зміцнюючої технології (для варіантів 1-7) або матеріалу покриття гільзи циліндра, матеріалу кільця і зміцнюючої технології (для варіантів 8-15).
2. Параметри режиму напилення.
3. План технологічних операцій.
4. Технологічні особливості напилення гільзи циліндра. Схему плазмового напилення внутрішньої поверхні гільзи циліндра.
5. Величина припуску на механічну обробку і ескіз гільзи циліндра з нанесеним покриттям з урахуванням припуску на механічну обробку.
6. Режими механічної обробки покриття.
7. Час нанесення проміжного і основного покриття.
8. Час механічної обробки.
9. Метод контролю якості напилених втулок.
10. Висновки та пояснення отриманих результатів

Таблица 2.3

Исходные данные для выбора материала и оборудования при восстановлении чугунных втулок цилиндров

№ п/п	Материал покрытия втулки	Материал кольца	Температура поверхности втулки, °С	Плазмооб-разующий газ	Марка плазмо-трона	Износ покрытия втулки, мм	Износ кольца, мм	Кэффи-циент трения	Упрочняющая технология поршневого кольца
1	ПН85Ю15+TiN	Чугун легир.	800	Ar + 10%N <sub>2</sub>	ПП 25	0,03	0,04	0,08	
2	ПН85Ю15+TiN	Чугун легир.	800	Ar + 10%N <sub>2</sub>	ПП 25	0,02	0,01	0,06	Хром гальван.
3	ПН85Ю15+TiN	65Г	800	Ar + 10%N <sub>2</sub>	ПП 25	0,04	0,02	0,07	
4	ПН85Ю15+TiN	65Г	800	Ar + 10%N <sub>2</sub>	ПП 25	0,02	0,01	1,20	Сульфаци-нирование
5	ПН85Ю15+TiN	Чугун легир.	800	Воздух	C2B3	0,02	0,02	0,09	
6	ПН85Ю15+TiN	Чугун легир.	800	Воздух	C2B3	0,01	0,01	0,06	Хром гальван.
7	ПН85Ю15+TiN	65Г	800	Воздух	C2B3	0,04	0,01	0,06	
8	ПН85Ю15+TiN	65Г	800	Воздух	C2B3	0,02	0,01	1,20	Сульфаци-нирование
9	ПН85Ю15+ZrO <sub>2</sub>	Чугун легир.	900	Ar + 10%N <sub>2</sub>	ПП25	0,01	0,01	0,06	
10	ПН85Ю15+ZrO <sub>2</sub>	Чугун легир.	900	Ar + 10%N <sub>2</sub>	ПП 25	0,04	0,05	0,80	Хром гальван.
11	ПН85Ю15+ZrO <sub>2</sub>	65Г	900	Ar + 10%N <sub>2</sub>	ПП 25	0,02	0,02	0,06	
12	ПН85Ю15+ZrO <sub>2</sub>	65Г	900	Ar + 10%N <sub>2</sub>	ПП 25	0,04	0,04	1,20	Сульфаци-нирование
13	ПН85Ю15+ZrO <sub>2</sub>	Чугун легир.	900	Воздух	C2B3	0,01	0,02	0,06	
14	ПН85Ю15+ZrO <sub>2</sub>	Чугун легир.	900	Воздух	C2B3	0,05	0,05	0,90	Хром гальван.
15	ПН85Ю15+ZrO <sub>2</sub>	65Г	900	Воздух	C2B3	0,02	0,02	0,07	
16	ПН85Ю15+ZrO <sub>2</sub>	65Г	900	Воздух	C2B3	0,04	0,04	0,90	Сульфаци-нирование*
17	ПГ-CP4	Чугун легир.	800	Воздух	АПРН	0,02	0,02	0,06	Хлорбариевая ванна
18	ПГ-CP4	Чугун легир.	800	Воздух	АПРН	0,01	0,01	0,06	Хром гальван.
19	ПГ-CP4	65Г	800	Воздух	АПРН	0,03	0,06	0,07	Сульфаци-нирование

Примечание: \* — упрочняющая технология для покрытия втулки цилиндра.

### Контрольні питання

1. Причини зносу гільз циліндрів судових дизелів?
2. Переваги технології плазмового напилення для відновлення втулок в порівнянні з нанесенням хрому?
3. Конструкція і принцип роботи плазмотрона?
4. Які матеріали застосовують для відновлення внутрішньої поверхні втулок циліндрів двигунів внутрішнього згорання?
5. Виберіть оптимальну пару тертя гільза циліндра-поршневі кільця з табл. 2.3 і обґрунтуйте свою точку зору.

### Рекомендована література

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – К. : Наукова думка, 1987. – 544 с.



### 17 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ОБЛАСТІ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ЧАВУНУ

Мета заняття: – ознайомлення студентів з методикою вибору оптимальної області параметрів режиму технологічного процесу.

#### Загальні положення

**Методика вибору параметрів режиму наплавлення.** При оптимізації технологічних процесів часто виникає необхідність в одночасному розгляді декількох параметрів оптимізації. У таких випадках вирішують компромісні завдання, т.е. знаходять умовний екстремум для однієї поверхні відгуку при обмеженнях, що накладаються однією або декількома іншими поверхнями відгуків. Так, наприклад, режим наплавлення на чавун необхідно вибрати таким, щоб забезпечувалися мінімальні глибина проплавлення чавуну і ширина ледебуритної зони при заданій товщині наплавленого шару. Часто при визначенні умов протікання того чи іншого процесу накладаються обмеження економічного характеру, наприклад, вартість присадочного матеріалу.

Якщо моделі для всіх параметрів оптимізації лінійні функції, то для вирішення компромісної задачі можна користуватися методами лінійного програмування.

Однак при вирішенні задач оптимізації технологічного процесу моделі для параметрів оптимізації часто представлені нелінійними функціями. У цих випадках компромісні завдання можна вирішувати двома способами - графоаналітичним і аналітичним. Перший спосіб, заснований на аналізі суміщених функцій відгуків, простий і відрізняється великою наочністю (рис. 3.1).

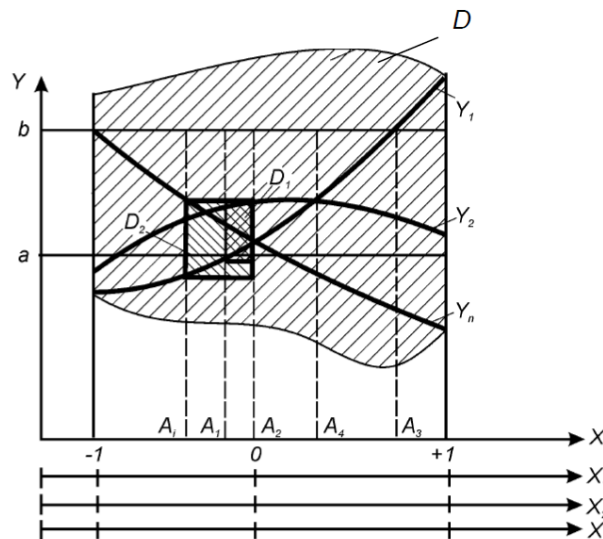


Рисунок 3.1 – Схема вибору оптимальної області факторів технологічного процесу

При зміні чинників від -1 до +1 значення функцій  $Y_i = f(x)$  утворюють багатокутну фігуру - область D змін параметрів матеріалу поверхневого шару від факторів процесу формування (рис. 3.1). При використанні методу планування експериментів чинники процесу формування наведені після кодування до єдиної

шкалою, що дозволяє побудувати номограму, незважаючи на відмінність їх в розмірностях і чисельних значеннях факторів.

Практично при вирішенні будь-якої технологічної задачі існують обмеження на параметри матеріалу або поверхневого шару, або зон зварного з'єднання (твердість, міцність зчеплення нанесеного шару з основою, величина залишкових напруг, глибина проплавлення, обмеження за наявністю метастабільних структур або дефектів - пори, несплавлені, мікротріщини - і ін.) для конкретної поверхні деталі в залежності від технології її відновлення і умов її експлуатації. Тому з області  $D$  необхідно вибрати таку область  $D_i$ , яка буде забезпечувати всі вимоги, що пред'являються до даної деталі або будь-якої її поверхні. Для цього нанесемо на номограму (рис. 3.1) обмеження на параметри матеріалу  $a$  і  $b$ . Рішення завдання побудови кордонів області  $D_i$  називається визначенням допусків на параметри матеріалу поверхневого шару і фактори процесу формування. Завдання синтезу допусків на параметри матеріалу і фактори процесу формування в залежності від  $Y_i$  в інтервалі  $[a, b]$  розглядається як задача оптимальної апроксимації області формування заданих параметрів. Таке уявлення дозволяє визначати вимоги до кожного параметру окремо, перерозподіляти допуски на параметри матеріалу і фактори процесу формування в межах області  $D$ . Але при цьому іноді виникає ряд протиріч, наприклад:

1) при обмеженні параметра  $Y_1$  прямий  $b$  ( $x$  може змінюватися в межах від  $-1$  до  $A_3$ ) і параметра  $Y_n$  прямий  $a$  ( $x$  може змінюватися в межах від  $-1$  до  $A_2$ ), і при цьому оптимізацію проводимо по  $Y_2$  ( $Y_2 \max$ , наприклад, міцність зчеплення покриття з основою), то оптимальною буде область  $D_1$  ( $x = [A_1 A_2]$ ). В даному випадку проблем з перебуванням оптимальної області немає, тільки в залежності від жорсткості вимог оптимальної може бути область  $D_1$  або  $D_2$  ( $x = [A_i A_2]$ ). Більш повне використання області  $D$  дозволяє знизити вартість процесу технологічного формування параметрів матеріалу, т. к. Зменшення області параметрів посилює вимоги до точності факторів і може привести до необхідності автоматизації всього процесу або тільки автоматичної підтримки деяких параметрів в допустимих межах, а також застосуванні більш точних приладів контролю технологічного процесу;

2) при обмеженні  $Y_1$  прямими  $a$  і  $b$  ( $x$  може змінюватися в межах від  $A_2$  до  $A_3$ ), а  $Y_n$  прямий  $a$  ( $x$  може змінюватися в межах від  $-1$  до  $A_2$ ) маємо точку оптимуму, відповідну  $x = A_2$  (0);

3) при необхідності забезпечення  $Y_1$  і  $Y_n \min$  і  $Y_2 \max$  система виходить досить невизначеною при необхідності вибору оптимальних параметрів  $x$ , т.к. збільшення параметрів  $x$  призводить одночасно до прямо протилежних вимогам: до збільшення  $Y_1$  і зменшення  $Y_n$ . Однак необхідно вибрати параметри так, щоб максимально задовольнити дані вимоги. Необхідно знайти математичне рішення для пошуку рішення, найбільш повно задовольняє вимогам (пакет Microsoft Excel дозволяє проводити таку оптимізацію при наявності обмежень на різні параметри). Графічно - це область  $x = [A_1 A_4]$ ,

але можна знайти такі параметри за рахунок різного їхнього впливу на  $Y_1$ ,  $Y_2$  і  $Y_n$ , які будуть задовольняти вимогам більш повно. Графічно це вирішується при побудові номограм, в яких деякі параметри в залежності від їх ступеня впливу на домінуючі відгуки встановлені на фіксовані рівні, на яких забезпечується найбільш прийнятний результат. Наприклад, при плазмовому наплавленні на чавун витрата

плазмообразуючого газу найбільш суттєво впливає на глибину проплавлення чавуну (зі збільшенням витрати плазмообразуючого газу різко зростає глибина проплавлення чавуну, тому витрата повинен бути мінімальним для уникнення утворення зони отбела на кордоні сплаву і можливості подальшої механічної обробки зварного з'єднання), але при цьому не робить істотного впливу на інші технологічні параметри зварного з'єднання.

У процесі формування приватних відгуків немає повної визначеності про вихідні властивості матеріалу, закономірності перебігу перетворення в поверхневому шарі матеріалу від технологічних і експлуатаційних впливів під впливом різноманітних, слабо контрольованих і складним чином взаємодіючих причин. Наприклад, механічні властивості матеріалу поверхневого шару при формуванні технологічними методами залежать від складної взаємодії таких випадкових факторів, як міцність і анізотропія окремих кристалів, зерен і між зернових утворень, розподілу дислокацій, хімічного складу основного і присадочного матеріалів і т. П. Однак, при всій різноманітності збурень, що діють на поверхневий шар в процесі формування властивостей матеріалу, необхідно врахувати випадковий характер всіх діючих факторів збурень і проеспечити формування необхідних параметрів із заданою вірогідністю.

Облік випадковості формування приватного відгуку здійснюється, як правило, шляхом «посилення» (зменшення) області параметрів технологічного процесу. Іноді бувають випадки, коли для забезпечення необхідної якості при істотній зміні параметрів матеріалу деталі доводиться змінювати технологічний процес, додаючи ще технологічні операції. Наприклад, при плазмовому наплавленні посадочних поверхонь деяких втулок циліндрів верхній шар чавуну виявляється дефектним (містить пори, порожнечі, пухкості) після протачивання. При наплавленні на цей шар наплавлений метал представляє собою пористий метал у вигляді пемзи. Для усунення цього дефекту необхідно попередньо оплавлятися поверхневий шар чавуну на глибину близько 1 мм, що відповідає глибині проплавлення при наплавленні. Режим оплавлення: мінімальний струм і максимальна швидкість з рекомендованого діапазону режимів наплавлення чавуну. Для проектування ТП плазмового наплавлення порошками на нікелевої основі необхідні моделі, що описують вплив параметрів процесу наплавлення на геометричні розміри валика і металографічні характеристики зварного з'єднання.

**Формування властивостей матеріалу при плазмовому наплавленні сплавів на нікелевій основі на сірий чавун.** Як параметри оптимізації обрані: якість наплавленого металу  $K$ ; глибина проплавлення чавуну  $h$ ; площа, зайнята ледебуріта  $S$ ; ширина ледебуритної зони  $Вл$ ; ширина ЗТВ ВТ; зміст мартенситу  $M$  в ЗТВ. На підставі попередніх експериментів обрані чотири фактори, які суттєво впливають на якість з'єднання і можуть бути керовані (табл. 3.1): зварювальний струм,  $I$  ( $X1$ ), витрата плазмообразуючого газу  $Q$  ( $X2$ ), швидкість наплавлення  $V$  ( $X3$ ), полярність струму.

Для визначення впливу параметрів процесу на якість наплавленого металу і з'єднання його з чавуном були розроблені критерії оцінки якості в балах в залежності від кількості і значущості дефектів (табл. 3.2).

Таблиця 3.1 – Рівні факторів та інтервали їх варіювання

Наименование фактора	Кодовое обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		нижний -1	основной 0	верхний +1	
Сварочный ток, А	$X_1$	140	150	160	10
Расход плазмобразующего газа, л/мин	$X_2$	3	4	5	1
Скорость наплавки, м/ч	$X_3$	5	6	7	1
Полярность тока	$X_4$	Обратная	–	Прямая	–

Таблиця 3.2 – Критерії оцінки зварного з'єднання

Характеристика дефектов сварного соединения	Балл
Наличие шлаковых включений на границе сплавления наплавленного валика с чугуном длиной до 2 мм. Макропоры диаметром до 1,2 мм в количестве 10–20 шт. на шлифе	1
Наличие шлаковых включений на границе сплавления наплавленного валика с чугуном длиной до 1 мм. Макропоры диаметром до 1,2 мм в количестве 5–10 шт. на шлифе	2
Нерастворившиеся пластинки графита в зоне сплавления. Макропоры диаметром до 1,2 мм в количестве 3–8 шт. на шлифе	3
Нерастворившиеся пластинки графита в зоне сплавления. Макропоры диаметром до 1,2 мм в количестве не более 5 шт. на шлифе	4
Макропор нет. Граница сплавления без дефектов	5

В результаті дослідження отримано залежності формування параметрів матеріалу від параметрів режиму наплавлення (індекс «П» позначає пряму полярність, а «О» - зворотний):

– якість наплавленого металу і зони сплаву

$$K_{\text{п}} = 0,15I - 20,0, \quad (3.1)$$

$$K_{\text{о}} = 0,5Q - 0,5V + 5,0, \quad (3.2)$$

– глибина проплавлення чавуну

$$h_{\text{п}} = 0,048I - 0,1Q - 0,07V - 5,61 \text{ (мм)} \quad (3.3)$$

$$h_{\text{о}} = 2,45 - 0,0135I + 0,05Q \text{ (мм)} \quad (3.4)$$

– ширина ледебуритної зони

$$B_n^T = 0,002I + 0,015Q + 0,025V - 0,41 \text{ (мм)}, \quad (3.5)$$

$$B_o^T = 0,0025I - 0,01V - 0,165 \text{ (мм)}, \quad (3.6)$$

– ширина зони термічного впливу

$$B_n^T = 0,038I - 0,1V - 2,9 \text{ (мм)}, \quad (3.7)$$

$$B_o^T = 0,016I + 0,32Q - 0,655V + 3,03 \text{ (мм)}, \quad (3.8)$$

– зміст мартенситу в зоні термічного впливу

$$M_n = 204 - 1,17I - 27,5Q + 20,2V \text{ (%)}, \quad (3.9)$$

$$M_o = 0,895I - 20,15Q + 8,95V - 87,2 \text{ (%)}. \quad (3.10)$$

### Порядок виконання роботи

Кожен студент після ознайомлення з методичними вазівками виробляє вибір параметрів режиму плазмового наплавлення чавуну на прямий і зворотній полярності графоаналітичним методом. Для знаходження оптимальної області параметрів режиму необхідно:

1. Намалювати залежності: якості наплавленого металу і зони сплаву, глибини проплавлення чавуну, ширини ледебуритного зони і змісту мартенситу в зоні термічного впливу для прямої і зворотної полярності від струму дуги при різних параметрах плазмообразуючого газу і швидкості наплавки;

2. Знайти і обґрунтувати оптимальну область параметрів режиму плазмового наплавлення чавуну, що забезпечує максимальну якість наплавленого металу і зони сплаву при мінімальних глибині проплавлення чавуну, ширині ледебуритного зони, ширині зони термічного впливу і змісту мартенситу в зоні термічного впливу.

### Зміст звіту

1. Основні теоретичні положення вибору оптимальних параметрів режиму технологічної операції.

2. Вихідні залежності характеристик зварного з'єднання від параметрів режиму плазмового наплавлення.

3. Оптимальні параметри режиму наплавлення, що забезпечують задані критерії.

4. Висновки та пояснення отриманих результатів.

### Контрольні питання

1. За яких умов при наплавленні на чавун утворюються такі структури: ледебурит, мартенсит і троостит?

2. Що таке плазма і за яких умов вона утворюється?

3. Які гази застосовуються в якості плазмообразуючих?

4. Чому чавун відноситься до важкозварювальних матеріалами?
5. Які дефекти утворюються при наплавленні на чавун?
6. Які технологічні прийоми застосовують для отримання якісного зварного з'єднання?

### **Рекомендована література**

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – К. : Наукова думка, 1987. – 544 с.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4

### ВИСОКОШВИДКІСНЕ ГАЗОПОЛУМЕНЕВЕ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ

**Мета заняття:** вивчити сутність і сфери застосування газопламенного напилення при ремонті деталей автомобілів, тракторів і сільськогосподарських машин, у тому числі технологічних особливостей високошвидкісного газопламенного напилення.

#### Завдання роботи

- вивчити технологічні особливості газопламенного напилення.
- вивчити типи, пристрій і принцип роботи газових металізатора.
- вивчити параметри режиму газопламенного напилення і вплив їх на якість напиляного шару.
- вивчити конструктивні і технологічні особливості високошвидкісного газопламенного напилення.

#### Теоретичні основи газопламенного напилення

Газополум'яне напилення здійснюється апаратами, які забезпечують розплавлення напилюваного матеріалу ацетилено-кисневим або пропано-кисневим полум'ям, а його розпорошення на дрібні частинки і надання їм необхідної швидкості польоту - струменем стисненого газу. На відміну від електродугового напилення при газополум'яному напилюванні як напилюваного матеріалу крім дроту застосовують порошки легованих самофлюсуючі сплавів.

На рис. 4.1 представлена схема газопламенного напилення з розпиленням дроту. Дріт 3 подається спеціальним механізмом, що подає із заданою швидкістю в високотемпературну зону газового полум'я 7 і розплавляється.

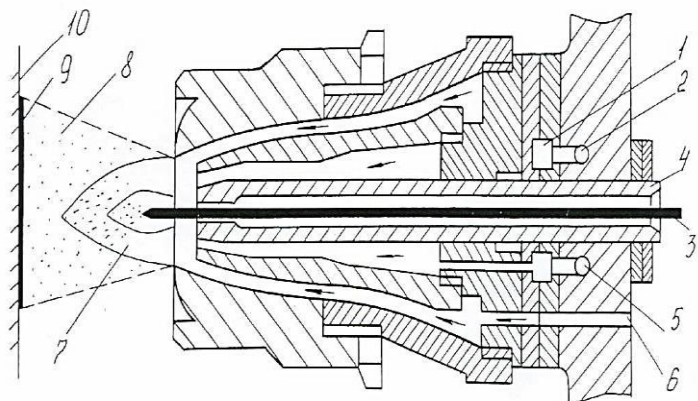


Рисунок 4.1 – Схема газопламенного напилення з розпиленням дроту:

- 1 - камера змішувача; 2 - канал подачі водню; 3 - дріт;  
 4 - напрямна втулка; 5 - канал подачі ацетилену; 6 - канал подачі стисненого повітря; 7 - ацетилено-кисневе полум'я; 8 - газометалліческа струмінь;  
 9 - Напилювана поверхню; 10 - деталь

Розплавлений метал транспортується газом, що подається через канал 6, розпорошується на дрібні фракції розміром 50 ... 200 мкм і прискорюється. При



досягненні поверхні деталі в пластичному стані розпорошені частки металу деформуються і впроваджуються в її нерівності і пори, утворюючи покриття, як при електродуги напиленні. Як горючий газ через канал 5 подається пропан або ацетилен, а через канал 2 - кисень, який збільшує температуру згоряння пального газу. Максимальна температура горіння ацетилену з киснем досягає  $3100^{\circ}\text{C}$ , а пропану з киснем -  $2200^{\circ}\text{C}$ . Тому для напилення металів і сплавів з низькою температурою плавлення застосовують пропан, а з високою температурою плавлення - ацетилен. Одночасно для напилення низькотемпературних металів зазвичай застосовують дроту, а високотемпературних - порошки.

При згорянні горючого газу в суміші з киснем можна отримувати три види полум'я: нормальне, окисне або відновне. Окислювальне полум'я для напилення практично не застосовується, тому що надлишок кисню окисляє напилюваний метал, що різко знижує якість напиляного шару. Відновне полум'я застосовують, коли в якості транспортує газу використовують повітря. У цьому випадку надлишок горючого газу нейтралізує кисень повітря і окислення напилюваного металу не відбувається. Якщо для транспортування і прискорення частинок напилюваного металу застосовувати азот або аргон, то в цьому випадку застосовують нормальне полум'я, коли відбувається повне згоряння горючого газу і кисню. Нейтральне середовище полум'я надійно захищає частки напилюваного металу від окислення і якість напиляного шару виходить висока.

На рис. 4.2 зображена схема газопламенного напилення з розпиленням порошку. Порошок з бункера 1 транспортується газом подається в зону газового полум'я 5, в якому частинки порошку швидко розплавляються і прискорюються, утворюючи газо-металеву струмінь 6. Далі процес нанесення покриття аналогічний, що і при напиленні дротяного матеріалу.

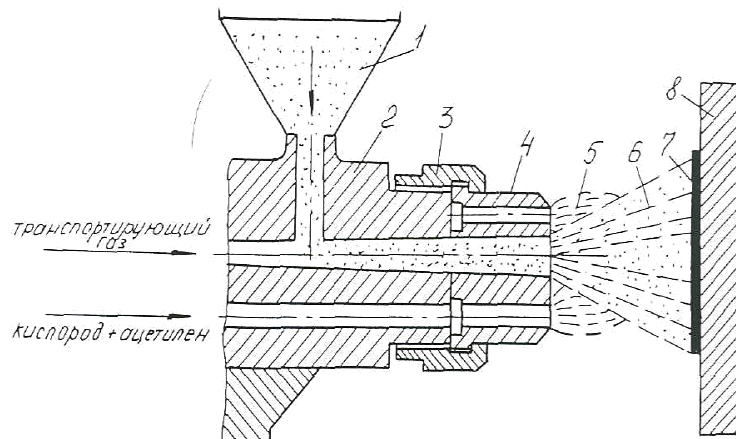


Рисунок 4.2 – Схема газопламенного напилення з розпиленням порошку:

- 1 – бункер з порошком; 2 – корпус головки; 3 – гайка; 4 – сопло;  
 5 – факел газового полум'я; 6 – газометаліческа струмінь; 7 – напилений лад;  
 8 – деталь

Для виконання газопламенного напилення промисловість випускає ручні і верстатні Металізатори. Ручними металізатора напилюють порошки, а верстатними - порошки або дроту.



### Області застосування

Газополум'яне напилення застосовують для відновлення зношених робочих поверхонь із зносом не більше 2 мм і для нанесення антикорозійних і декоративних покриттів. Для відновлення зносів наносять сталі і легирован-ні сплави, що дозволяє отримувати високі фізико-механічні та експлуатаційно-ційних властивості робочих поверхонь. Для нанесення антикорозійного покриття наносять цинк, алюміній, нікель, а для декоративних покриттів нікель, хром та інші сплави легуючих елементів.

### Переваги газопламенного напилення

Невелике окислення напилюваного матеріалу.

Невеликий нагрів деталі (не більше 200 ° С).

Дрібний розпил напилюваного матеріалу.

Порівняно просте обладнання і недорогі витратні матеріали.

Можливість відновлення дуже малих зносів (до 0,1 мм) і отримання напиляного шару з заданими фізико-механічними властивостями.

### Недоліки способу

Нестабільність надійного зчеплення частинок напилюваного матеріалу між собою і з поверхнею деталі, що часто вимагає подальшого оплавлення напиляного шару газовим полум'ям або індукційним нагріванням.

Порівняно низька продуктивність (2...4 кг / год).

Підвищена вибухо- і пожежонебезпека.

### Параметри газопламенного напилення

1. Відстань від металізатора до поверхні деталі, що підлягає напилюванню – Н.

Від величини Н залежить агрегатний стан частинок напилюваного металу в момент зіткнення з поверхнею деталі. Величина Н вибирається такий, щоб в момент досягнення поверхні деталі метал напилюються частинок знаходився в пластичному стані. Якщо Н буде менше оптимальної величини, то частинки будуть в рідкому стані і це буде не напилення, а наплавлення. Якщо Н буде більше оптимального значення, то частинки будуть досягати поверхні деталі в твердому стані (відбудеться вторинна кристалізація металу) і вони будуть відскакувати від поверхні деталі або налипає на поверхню практично без зчеплення. Величина Н залежить від теплової потужності газового пла-мени, витрати напилюваного матеріалу, тиску транспортує газу і раз-мерів частинок напилюваного металу. Вона підбирається експериментально або береться за довідковими таблицями. Зазвичай величина Н = 100 ... 150 мм.

2. Лінійна швидкість напилення –  $v_H$ .

Величина  $v_H$  залежить від необхідної висоти напиляного шару і виробляйності металізатора на вибраному режимі. Величину  $v_H$  визначають експериментально або розрахунком за формулами

$$v_H = \frac{Q_H}{B \cdot h_H} \dots \text{(для порошку);} \dots \dots \dots (4.1)$$

$$v_n = \frac{\pi d_n^2}{4 \cdot B \cdot h_n} \cdot v_{nn} \dots \text{ (для дроту),} \dots \dots \dots (4.2)$$

- де  $v_n$  – лінійна швидкість напилення, м / год;  
 $Q_n$  – витрата напилюваного порошку, м<sup>3</sup> / год;  
 $d_n$  – діаметр дроту, м;  
 $B$  – ширина напиляного шару, м;  
 $h_n$  – висота напиляного шару, м.
3. Швидкість обертання деталі –  $n$ .  
 Вона визначається за формулою:

$$n = \frac{\pi d_d}{v_n} \dots \dots \dots (4.3)$$

- де  $d_d$  – діаметр напиляемой деталі, м;  
 $v_n$  – швидкість напилення, м / хв;  
 $n$  – швидкість обертання деталі, об / хв.

Швидкість обертання деталі в існуючих технологічних процесах напилення становить 10 ... 15 об / хв.

4. Продуктивність напилення -  $q_n = 2 \dots 3$  кг / год.  
 5. Тиск стисненого повітря –  $P_e = 4 \dots 5$  кгс / см<sup>2</sup>.  
 6. Витрата ацетилену –  $Q_a$ .

Він визначає теплову потужність полум'я і вибирається за довідниками відпрацьованих процесів або експериментально ( $Q_a = 240 \dots 800$  дм<sup>3</sup> / год).

7. Витрата кисню –  $Q_k$ .

Він визначає тип полум'я (нормальне, окисне або відновне). Як правило витрата кисню підбирається експериментально для заданої витрати пального газу за параметрами факела і може становити 300...2000 дм<sup>3</sup> / год.

8. Витрата напилюваного порошку –  $Q_n$ , м<sup>3</sup> / год (кг / год).  
 9. Швидкість подачі дроту –  $v_{nn}$ , м / год.

Величини  $Q_n$  і  $v_{nn}$  визначають продуктивність газового металізатора і висоту напиляного шару.

10. Діаметр дроту –  $d_n$ , мм.

### Лабораторна установка для газопламенного напилення

Різновидом газопламенного напилення є надзвукове газополуменеве напилювання. На рис. 4.3 зображена принципова схема установки для надзвукового напилення.

На виході газогенератора 1 виходить надзвукова струмінь 2, в яку механізм подачі 4 під кутом подається дріт 3. Теплом газопламенної струменя торець дроту плавиться і розпорошується на дуже дрібні частинки, які разганяються надзвуковий струменем і переносяться на деталь 5. У газогенераторе проісходіт згоряння пропану в стислому повітрі. Пропан з балона 6 через відкритий вентиль 7 і регулюючий клапан 8 надходить в ресивер 9, тиск в якому контролюється по манометру 10, а потім - в газогенератор. Повітря подається від компресора 11 через вентиль 12 і регулює дросель 13 в ресивер 14, тиск в якому контролюють за манометром 15, з якого потім надходить, як і пропан, в газогенератор. Запуск газогенератора здійснюється за допомогою високовольної свічки 16, ввернутої в

газогенератор. Напруга на свічку подається від високовольтного блоку 17 при включенні тумблера 19. Після розпалювання га-зогенератора тумблером 18 включається механізм подачі дроту, яка надходить в зону надзвуковий струменя 2.

### Основні параметри наплення

Паливо: стиснене повітря під тиском  $P_B = 0,55 \dots 0,75$  МПа; пропан під тискуням  $P_T = 0,45 \dots 0,65$  МПа.

Витрата повітря  $q_B = 8 \dots 10$  г / с.

Витрата пропану  $q_P = 0,6 \dots 0,7$  г / с.

Швидкість струменя на виході з сопла  $v_C = 1100 \dots 1300$  м / с.

Температура струменя  $T_c = 1200 \dots 1400$  К.

Швидкість подачі дроту  $v_{\text{шт}} = 7,2 \dots 36$  м / год.

Діаметр розпилюється дроту  $d_e = 1,2 \dots 3$  мм

Відстань від сопла газогенератора до поверхні деталі  $H = 80 \dots 150$  мм.

Напилюваний матеріал: алюміній, цинк, мідь, латунь, бронза.

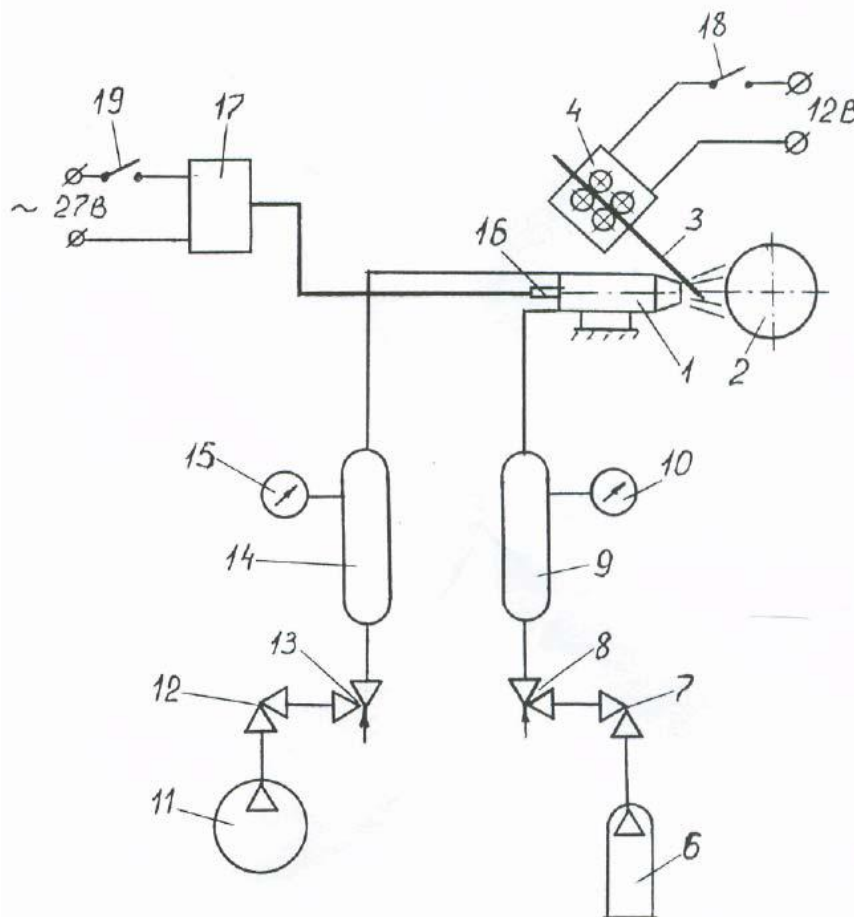


Рисунок 4.3 – Схема лабораторної установки для надзвукового газополуменевого наплення:

1 - газогенератор; 2 - надзвукова струміль; 3 - дріт; 4 - механізм подачі дроту;

5 - напилювана деталь; 6 - балон з пропаном; 7,12 - вентилі;

8,13 - регулюють дроселі; 9,14 - ресивери; 10,15 - манометри;

11 - повітряний компресор; 16 - високовольтна свічка;

17 - високовольтний блок запалювання; 18,19 – тумблери

### Технічне оснащення роботи

Обладнання: установка У-653А; надзвукова головка для наплення;

повітряний компресор.

Матеріали: алюмінієвий дріт діаметром 3 мм; пропан в балоні; заготовки з труби діаметром 40,50 і 60 мм з обробленою поверхнею.

### **Порядок виконання експерименту**

Очистити поверхню зразка від забруднень металевою щіткою.

Закріпити зразок в патроні обертача установки У-653А.

Підвести газогенератор до поверхні деталі на відстань 80...100 мм.

Запустити газогенератор, включити обертання деталі і подачу дроту.

Напилити алюміній на всю поверхню деталі.

Зупинити обертання деталі і вимкнути газогенератор.

Дати охолонути деталі.

Оцінити оглядом якість напиляного шару.

### **Зміст звіту**

1. Номер і назва роботи.
2. Мета і завдання роботи.
3. Сутність процесу газопламенного напилення.
4. Схеми газопламенного напилення з розпиленням порошку і дроту.
5. Области застосування, переваги, недоліки газопламенного напилення.
6. Схема лабораторної установки для надзвукового газопламенного напилюю.
7. Параметри надзвукового газопламенного напилення.
8. Висновки по роботі.

### **Контрольні питання**

1. У чому полягає сутність газопламенного напилення?
2. Які гази застосовуються при газополуменеве напилювання?
3. В яких випадках найбільш доцільно застосовувати в якості розпорошується матеріалу дріт, а в яких - порошки?
4. Для відновлення яких властивостей деталей можна застосовувати газополуменеве напилювання?
5. Які параметри режиму газопламенного напилення впливають на якість напиляного шару?
6. Чим відрізняється надзвукове напилення від звичайного газопламенного?
7. Які гази застосовують при надзвуковому газополуменеве напилювання?
8. Які матеріали застосовують при газополуменеве напилювання?

### **Рекомендована література**

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – К. : Наукова думка, 1987. – 544 с.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5 ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ХОЛОДНИМ ГАЗОДИНАМІЧНИМ НАПИЛЕННЯМ

**Мета роботи:** вивчити технологію відновлення деталей машин із застосуванням ХГДН. Виконати експериментальну частину: вибір матеріалу і розрахунок режимів.

### Теоретичні положення

Відомо, що на поверхнях деталей, виготовлених з алюмінієвих сплавів, утворюється тонка товщиною (0,002-0,003) мкм, тугоплавка ( $T_{пл} = 2050 \text{ }^\circ\text{C}$ ) оксидна плівка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (стандартної ентальпії утворення при 298К-1 676 кДж / моль) перешкоджає міцному зчепленню наносяться при ХГДН порошоків. Травлення оброблюваної поверхні може забезпечити руйнування і видалення з поверхні шару оксиду, але не може привести до утворення поверхні з ненасиченими зв'язками. Крім цього розрив за часом між травленням і нанесенням покриттів досить великий і на поверхні алюмінієвого сплаву встигає утворитися окисна плівка.

Утворення покриттів при холодному газодинамічному напиленні не призводить до деформації виробу, виникнення внутрішніх напружень, структурних перетворень металу виробу. При цьому забезпечується локалізоване вплив на оброблювану деталь, впливаючи тільки на незношені ділянки.

Формування металевих покриттів, при холодному газодинамічному напиленні порошоків, засноване на явищі прилипання рухомих з великою кінетичною енергією твердих частинок порошку до поверхні-підложки в процесі їх високошвидкісного удару.

Дрібнодисперсний порошоківий матеріал розмірами від 5 до 50 мкм складається з суміші часток пластичного металу і частинок керамічних матеріалів в пропорції 50% на 50%.

Початкову швидкість частинки отримують від підігрітого до  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  і стисненого до 0,6 МПа повітря, а потім в надзвуковому соплі їх швидкість збільшується до декількох сотень метрів в секунду (рисунок 1). Після виходу зі надзвукового сопла частинки рухаються з середньою швидкістю 100 м / с до поверхні деталі і вдаряються з нею. Після зіткнення близько 30-40% частинок закріплюються на підложці, інша частина розсіюється в навколишнє середовище.

Процес взаємодії напилюваних частинок з поверхнею підкладки можна умовно розділити на три етапи:

На першій стадії потік високошвидкісних частинок за рахунок ерозійного впливу очищає поверхню підкладки від оксидів, масел, пухкої іржі, абсорбованих речовин і інших забруднень. Поверхня підкладки активізується, формується розвинений мікрорельєф.

Друга стадія - формування зони контакту покриття з підкладкою, відповідальної за міцність зчеплення. При високошвидкісному ударі частина частинок кераміки впроваджується в поверхню, утворюючи міцне механічне зчеплення з нею, а металеві частинки при цьому, пластично деформуючись,

активуються і активують приповерхневі кристалічні решітки підкладки, потім утворюють в зоні контакту хімічні зв'язки з підкладкою.

На третій стадії відбувається формування наступних шарів покриття, тобто утворення основної маси покриття. При цьому рушійні до поверхні частинки взаємодіють вже не з основною підкладкою, а з такими ж частками, які закріпилися на першому шарі.

Послідовні удари частинок по закріпилися на поверхні частинок металу деформують їх, ущільнюють покриття, зменшуючи або зовсім усуваючи зазори між частинками (зменшуючи її пористість), збільшуючи зони контакту сусідніх частинок (підвищуючи когезійну міцність покриття).

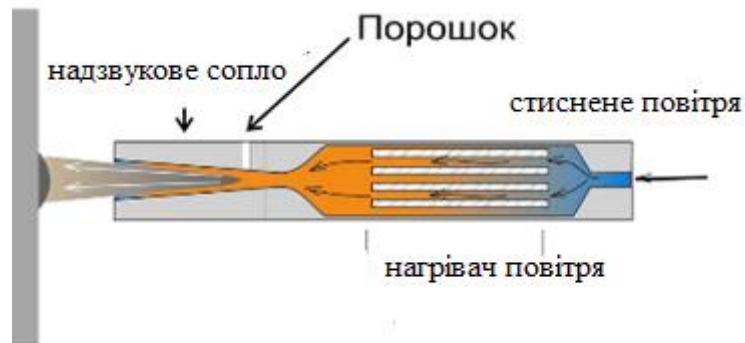


Рисунок 1 - Принципова схема процесу ХГДН

Аналіз процесу формування покриття показує, що можна виділити кілька механізмів, відповідальних за зчеплення частинок порошку з підкладкою (рис. 2).

По-перше, при тісному контакті кристалічних решіток частинок і підкладки (рис. 2, а) металеві зв'язки утворюються без плавлення частинки або підкладки аналогічний механізму зварювання металів вибухом (рис. 2, б).

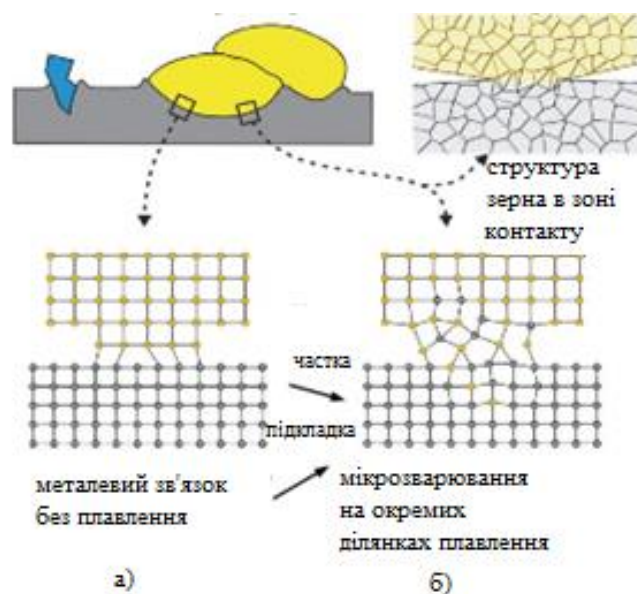


Рисунок 2 - Спосіб формування металевих покриттів при ХГДН.

В даний час випускають три модифікації устаткування ДИМЕТ: моделі 402, 403 і 412 призначені для ручного нанесення ряду металевих покриттів при виконанні широкого спектру робіт у виробництві, при ремонті і відновленні машин і механізмів різного призначення.

Для роботи обладнання необхідно стиснене повітря тиском 0,6-1,0 МПа (витрата 0,3-0,4 м<sup>3</sup> / хв). Чистота повітря, згідно з ГОСТ 17433-80, повинна відповідати класам 1,3,5. Необхідна електромережа напругою 220 В, 50 Гц.

### **Область застосування ХГДН**

Відновлення втрачених обсягів металу і дефектів алюмінієвого лиття (тріщин, каверн, свищів, пористості) у виробництві деталей. Технологія забезпечує ефективне поновлення робочих поверхонь різних машин і механізмів, що піддаються зносу або пошкодженень в процесі експлуатації: корпусу, кришки двигунів, редукторів, насосів, компресорів, ліжок підшипників, прес-форм для виготовлення пластикової і скляної упаковки, гумотехнічних виробів, форм для лиття по виплавлюваних моделях і ін.

Герметизація течі рідин і газів. Низька газопроникність покриттів дозволяє усувати течі робочих газів і рідин в тих випадках, коли неможливо використання герметизуючих компаундів.

Нанесення електропровідних покриттів. Технологічна простота нанесення металевих покриттів з високою електропровідністю (алюмінієвих, цинкових, мідних, нікелевих) на будь-яку металеву або керамічну основу дозволяє застосовувати їх в різних електронних і електротехнічних виробках.

Відновлення підшипників ковзання. Традиційна технологія ремонту експлуатаційного зносу і пошкодженень підшипників ковзання полягає або в повній перезаливці підшипника, або в локальній заливці дефектів поверхні, що далеко не завжди забезпечує необхідну якість.

Антикорозійний захист. Захист від низькотемпературної корозії забезпечується покриттями на основі алюмінію і цинку. Як показали випробування, покриття відповідають вимогам ГОСТу і за антикорозійними властивостями перевершують лакофарбові та багато інших металеві покриттів. Найбільш доцільною є антикорозійна обробка локальних вогнищ корозії, невеликих деталей, зварних швів.

### **Матеріали для ХГДН**

Як порошкові матеріали використовуються порошки металів, сплавів або їх механічні суміші з керамічними порошками Al, Zn, Cu, Pb, Ni, Баббит. При цьому шляхом зміни режимів роботи обладнання можна або проводити ерозійну обробку поверхні виробу, або наносити металеві покриття необхідних складів. Зміною режимів можна також змінювати пористість і товщину напилюваного покриття (табл. 1, 2).

Таблиця 1 - Рекомендації з використання порошкових матеріалів при проведенні ремонтно-відновлювальних робіт з обладнанням ДИМЕТ

Марка робочого порошку	Призначення покриттів, об'єкти ремонту і відновлення
Покриття на основі алюмінію і цинку	A-20-11 Герметизація течі алюмінієвих трубок, радіаторів, конденсаторів, теплообмінників, в тому числі герметизація зварних швів, корозійних і механічних пошкоджень. Ремонт тріщин і інших дефектів в алюмінієвих деталях.
Покриття на основі алюмінію і цинку	A-80-13 Ремонт тріщин, пробоїн та ін. Дефектів ГБЦ. Відновлення посадкових місць підшипників в алюмінієвих деталях. Заповнення каверн, пор, тріщин і ін. Дефектів в алюмінієвих деталях і виробках (в т. Ч в деталях двигунів, в формах для виготовлення пластмасових виробів і т.п.).
Покриття на основі міді та цинку	Z-01-11 Заповнення каверн, тріщин та інших дефектів в сталевих і чавунних корпусних деталях двигуна Відновлення посадкових місць підшипників в сталевих і чавунних деталях.
Покриття на основі міді	Z-01-01 Електропровідне покриття (на сталь, алюміній, кераміку) Подслої під пайку до алюмінію, сталі, чавуну.
Покриття на основі цинку	Z-00-11 Антикоровійний захист сталевих деталей і зварних швів. Заповнення вм'ятин на корпусі.
Покриття на основі свинцю	P1-00-01 Антикоровійний захист Герметизація дефектів. Мікротріщин, різьбових з'єднань.
Покриття на основі бабіту БК-2	БК2-100-60 Відновлення підшипників ковзання.
Покриття на основі бабіту БК-83	БК83-100-40 Відновлення підшипників ковзання.
Покриття на основі нікелю та цинку	N7-00-1 Заповнення каверн, прогарів і інших дефектів, відновлення форм деталей, що працюють при висотою температурі.
Покриття на основі нікелю	N3-00-02 Жаростійке покриття для захисту від високотемпературної корозії. Електропровідного покриття для контактних майданчиків електрообладнання.
	K-00-04-16 Очищення і струменево-абразивна підготовка поверхні сталі і чавуну під напилення.
	Нові види порошкових покриттів.
Покриття на основі алюмінію	A-30-01 Покриття на основі Антикоровійні покриття. Відновлення шару плакіровки на деталях при знижених температурах.
	A-20-01 Антикоровійні покриття. Відновлення форми алюмінієвих деталей. Захисне покриття сталевих деталей працюють при t 500-600 С. Герметизація наскрізних дефектів в металевих деталях.
	A-10-01 Відновлення форми алюмінієвих деталей. Створення дифузійного захисного шару на сталевих деталях працюють при t 800-1000 С. Подслої для нанесення мідних і нікелевих покриттів ка кераміку.
	A-10-04 Подслої для нанесення мідних і нікелевих покриттів на кераміку.
	A-40-01 Відновлення форми алюмінієвих деталей. Герметизація наскрізних дефектів у метал-ліческих деталях
	AS-41 Відновлення форми алюмінієвих деталей. Герметизація наскрізних дефектів в металевих деталях.
	A-10-00 Світловідбиваючі покриття на склі з підвищеною корозійною стійкістю.
Покриття на основі	K-00-004-02 Абразивная підготовка поверхні керамічних виробів для



оксиду алюмінію	нанесення металевих покриттів.
Покриття на основі алюмінію, цинку	А-20-10 Дзеркальне покриття на склі.
Покриття на основі міді, цинку	А-03-10 Електропровідне покриття на склі.

Таблиця 2 - Раціональні технологічні режими ХГДН

№ п/п	Марка порошку	Режими ХГДН			Товщина шару, мм	Суцільність покриття, %
		Температурний режим установки	Витрата порошку г / хв Час напилення см <sup>2</sup> в сек	Витрата порошку г / хв Час напилення см <sup>2</sup> в сек		
1	С-20-11	5	2,5	30	5,5	93
2	С-20-11	4	2	25	3,0	87
3	С-80-13	3	1,1-1,2	15	5,0	95
4	А-80-13	4	1,5	9	7,5	90
5	А-80-13	5	1	7	6,0	85

### Зміст роботи

Ознайомлення з теоретичними положеннями за технологією відновлення деталей машин і збірних одиниць за допомогою ХГДН;

Ознайомлення з порядком виконання лабораторної роботи;

Підготовка необхідних матеріалів та інструменту;

Виконання основної частини лабораторної роботи;

Оформлення звіту про виконану лабораторній роботі

### Устаткування, інструмент та апаратура

Установка ДИМЕТ-403, порошки для напилення;

Деталь для відновлення;

Знежирююча рідина (уайт-спирт ГОСТ 3134-78);

Протиральний матеріал.

### Безпека виконання роботи

При проведенні робіт повинні дотримуватися правила техніки безпеки за ГОСТ 12.4.113-82 ССБТ Роботи навчальні лабораторні. Загальні вимоги безпеки. ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ Оборудование производственное Загальні вимоги безпеки до робочих місць.

### Порядок виконання роботи

1. Інструктаж з техніки безпеки;
2. Підготовчий етап;
3. Підібрати режими і обґрунтувати їх вибір для відновлення деталі.
4. Виконавчий етап:
  - 4.1 Знежирити (провести очистку) поверхні.
  - 4.2 Нанести рівномірно на зовнішню поверхню матеріал.
  - 4.3 Оцінити нанесений шар

### **Складання звіту з лабораторної роботи**

Звіт з роботи в загальному вигляді повинен містити:

1. Титульна сторінка;
2. Найменування роботи;
3. Мета виконаної роботи;
4. Конспект лабораторної роботи;
5. Опис практичної частини;
6. Висновки і пропозиції

### **Контрольні питання**

1. Область застосування методу ХГДН;
2. Фізико-механічні властивості покриттів;
3. Призначення і типи матеріалів;
4. Технологія відновлення деталей машин із застосуванням методу ХГДН

### **Рекомендована література**

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – К. : Наукова думка, 1987. – 544 с.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ З ПОКРИТТЯМИ НА КОРОТКОЧАСНУ МІЦНІСТЬ

**Мета заняття:** дослідити вплив покриття і технології його отримання на зміну фізико-механічних характеристик матеріалів, зокрема, границю міцності композиційного матеріалу при випробуванні на розтяг.

### Теоретичні відомості

При дослідженні деформаційних і міцносних властивостей спостерігається зміна границі міцності і відносного подовження зразків із покриттями порівняно із зразками без покриття. Це можна пояснити зміною складу і структури як зразків, так і контактної зони, слідством чого є реалізація різноманітних напружених станів контактної зони, які обумовлюють кінетику руйнування при деформації. Умови, що реалізуються в контактній зоні, її склад та структура є визначальними для процесів деформування і руйнування композиційного матеріалу.

Іспити на розтяг є найбільш простим методом визначення міцносних і пластичних характеристик, бо цим методом в області рівномірної деформації найпростіше досягається одноосьовий напружений стан. Одноосьовий напружений стан зберігається тільки до утворення шийки, коли матеріал знаходиться під дією нормальних і дотичних напружень.

Стандартами регламентовані випробування на розтяг: при 15...30°C; при підвищених; при знижених температурах; при температурах від -100 до -269 °C. Розміри і форма зразків стандартизовані. Форма зразків циліндрична або призматична. Зазвичай, зразки мають дві голівки, форма і розміри яких відповідають затискним пристроям машини.

Зразки без голівок, які встановлюються в клинові затискні пристрої з гострими насічками, застосовують тільки для випробувань пластичних матеріалів. У зразках із крихкими покриттями переходи від голівок до робочої частини повинні виконуватися у вигляді галтелей великого радіусу (рис. 6.1).

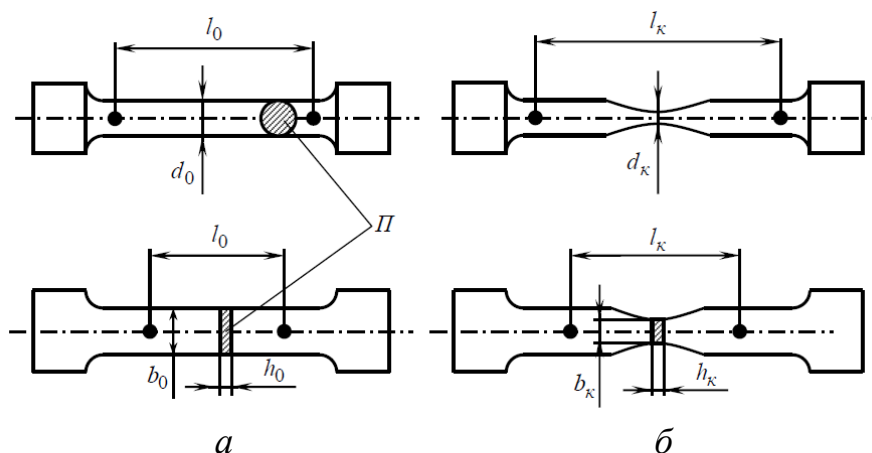


Рисунок 6.1 - Зразки для іспиту на розтяг і їхні розміри, необхідні для розрахунку механічних властивостей:

*a* – зразок до іспиту; *б* – зразок після іспиту; *П* – покриття

Графічне зображення залежності між розтягуючим навантаженням і подовженням дозволяє порівняти властивості матеріалів або їх стан, дає відомості про поведінку матеріалу в пружній і пластичній областях, дає змогу визначити ряд інших характеристик матеріалу. Умовою для цього є точна реєстрація кривої “зусилля-подовження”. Деякі типові діаграми “зусилля – подовження” різноманітних матеріалів наведені на рис. 6.2.

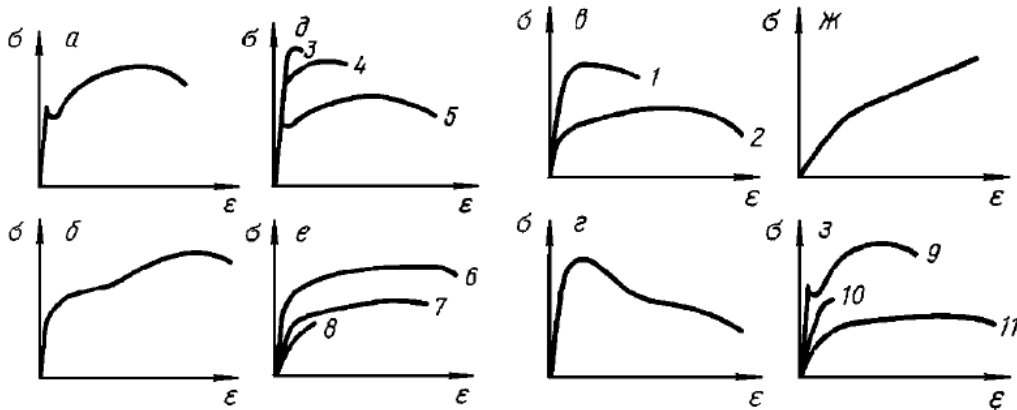


Рисунок 6.2 – Типові діаграми розтягу різноманітних матеріалів:

а – вуглецева сталь; б – аустенітна сталь; в – мідь холоднодеформована (1) і рекристалізована (2); г – твердий полівінілхлорид; д – вуглецева сталь загартована (3); поліпшена (4) і нормалізована (5); е – чавун із шаровидним графітом (6), із пластинчастим графітом (7), ферітний ковкий чавун (8); ж – синтетичний каучук; з – сталь марки С15 (9), сірий чавун (10), алюміній (11)

Зразки необхідно встановлювати у випробувальну машину таким чином, щоб навантаження на них було прикладене строго по центру. Несиметричне прикладання навантаження призводить до виникнення додаткових вигинаючих напружень, що спотворюють результат випробування.

Правильно встановлений зразок потрібно плавно і рівномірно із заданою швидкістю навантаження розтягувати до руйнування, знімаючи при цьому діаграму розтягу. Після руйнування зразка обидві його частини необхідно зберегти для подальшого використання при оцінці результатів досліду.

При випробуваннях на розтяг визначають характеристики міцності: тимчасовий опір (границя міцності)  $\sigma_v$ , границя текучості  $\sigma_T$  ( $\sigma_{0.2}$ ), дійсна границя міцності  $S_k$ , границя пропорційності  $\sigma_{пц}$  і границя пружності  $\sigma_{0.05}$ , а також характеристики пластичності: відносне подовження  $\delta$  і відносне звуження  $\psi$ .

Перед випробуванням визначаються (рис. 9.1, а): початкова розрахункова довжина зразка  $l_0$ ; початковий діаметр робочої частини циліндричного зразка  $d_0$ ; початкова товщина  $h_0$  і ширина  $b_0$  робочої частини плоского зразка. Обчислюється початкова площа поперечного перетину робочої частини зразка  $F_0$ . За  $l_0$  приймається ділянка робочої довжини зразка, на якій визначається подовження.

Крива випробування (діаграма розтягу) записується в координатах “навантаження – деформація” у необхідному масштабі (рис. 6.2). Після випробування зразків проводять виміри кінцевої розрахункової довжини

(рис. 6.1, б)  $l_k$ , визначають мінімальний діаметр циліндричного зразка  $d_k$ , мінімальну товщину і ширину робочої частини плоского зразка  $h_k$  і  $b_k$ . Підраховується мінімальна площа поперечного перетину зразка після розірвання  $F_k$ .

Міцнісні характеристики і характеристики пластичності визначаються з урахуванням результатів проведених вимірів, записаних для кожного зразка діаграм розтягу (рис. 6.3), початкових і кінцевих розмірів зразків по формулах (6.1):

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0}, \sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{F_0}, \sigma_{0.05} = \frac{P_{0.05}}{F_0}, \sigma_{m\mu} = \frac{P_{m\mu}}{F_0}$$

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\%, \phi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\%, S_k = \frac{P_k}{F_k} \quad (6.1)$$

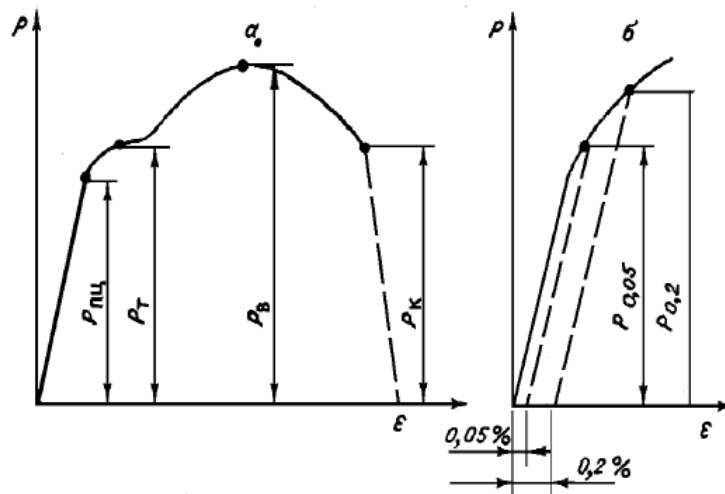


Рисунок 6.3 – Діаграми розтягу зразків:

а – при утворенні площадки текучості;

б – визначення умовних границь текучості і пружності.

Дослідження на короточасну міцність зразків з покриттями найчастіше проводяться на повітрі або у вакуумних високотемпературних установках. Використовуються стандартні зразки циліндричної форми діаметром 6 мм і довжиною робочої частини 30 мм, а також плоскої форми 5x3 мм і мікрозразки 2x1 мм довжиною робочої частини 30 мм. Швидкість навантаження 1...28 мм/м, вакуум до 10...6 мм рт.ст., діапазон температур 293...1200 °С.

### Необхідне обладнання, прилади і матеріали

1. Зразки плоскі чи циліндричні для випробування на розтяг.
2. Установка для наплення покриттів.
3. Установка для випробування на розтяг.
4. Матеріал для наплення.
5. Мікрометр, штангенциркуль.

Таблиця 6.1 – Характеристики циліндричних зразків з покриттями для випробування на розтяг

№	Матеріал покриття	Діаметр, $d_0$ , мм	Навантаження, Р, Н	$l_0$ , мм	$l_k$ , мм	$\varepsilon$ , %	$F_0$ , мм <sup>2</sup>	$F_n$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_e$ , МПа
без покриття									
з покриттям									

Таблиця 6.2 – Характеристика плоских зразків для випробування на розтяг з покриттями

№	Матеріал Покриття	Навантаження, Р, Н	$b_k$ мм	$l_0$ , мм	$l_k$ , мм	$\varepsilon$ , %	$F_0$ , мм <sup>2</sup>	$F_n$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_e$ , МПа
Без покриття									
з покриттям									

### Порядок виконання роботи

1. На абразивно-струменевій установці провести підготовку поверхні зразків під напилення.
2. Нанести покриття на зразки.
3. Встановити зразок спочатку без покриття, а потім із покриттям на випробувальну установку і розірвати зразок, записавши діаграму розтягу.
4. Записати результати іспитів і розрахунків згідно з формулами 6.1 у табл. 6.1 і табл. 6.2.
5. Випробування провести на трьох зразках без покриття і на трьох зразках з покриттям.
6. Випробування провести для покриттів із різних матеріалів.

### Вимоги до звіту по роботі

1. Привести мету роботи.
2. Дати короткий опис обладнання, яке використовувалось у роботі.
3. Описати порядок виконання роботи.
4. Привести в таблиці значення міцності.
5. Висновки по роботі.

### Контрольні питання

1. Яке випробувальне обладнання використовується для іспитів на розтяг?
2. Як впливають покриття на механічні характеристики?
3. Які основні характеристики отримують при випробуванні на розтяг?
4. Як покриття впливають на пластичні, пружні і міцнісні характеристики матеріалів?

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 7

### ОЦІНКА ЯКОСТІ НАПИЛЕННЯ ШЛЯХОМ СТАТИЧНОГО ВИПРОБУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЗГИНАННЯ

**Мета заняття:** шляхом статичних випробувань на згинання (із зосередженим навантаженням) побудувати діаграми згину сталевих зразків з покриттям і оцінити, на підставі отриманих експериментальних результатів, границі міцності при згинанні і ступінь впливу напилених покриттів на матеріал основи.

#### Теоретичні відомості

При визначенні міцності твердих сталей із покриттям, що працюють в умовах низьких (кімнатних) температур, виникають труднощі проведення випробування, обумовлені незначною пластичністю композиційного матеріалу, який досліджується. До того ж, результати звичайного випробування на розтяг дозволяють визначити вплив покриття на механічні характеристики матеріалів, але не дозволяють оцінити якість отриманого покриття, тривкості зчеплення покриттів, не дають можливості зафіксувати початок процесу їх відшарування і розтріскування.

Останній вимозі краще задовольняє статичне випробування на згинання. Воно просте за методикою, відрізняється незначним розкидом результатів і дозволяє знімати повну діаграму згинання на зразках нескладної форми (рис.7.1).

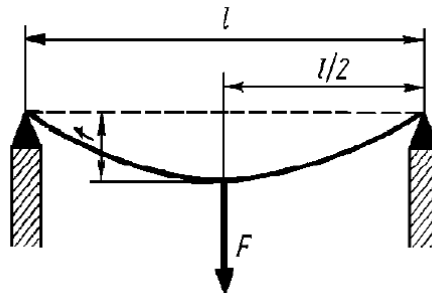


Рисунок 7.1 – Схема статичного випробування на згинання

Вимір прогину проводиться, як правило, безпосередньо на нижній стороні зразка за допомогою індикатора годинникового типу або індуктивного датчика переміщень. Щоб уникнути ушкоджень датчика переміщень при руйнуванні зразка, прогин останнього передається на нього за допомогою важеля. Необхідне для визначеного прогину зразка зусилля можна виміряти за допомогою звичайних силівимірників випробувальної установки.

Для проведення випробувань на згинання добре підходять універсальні розривні машини, які дозволяють проводити безперервну реєстрацію діаграми вигину в процесі дослідження.

По діаграмах згинання нескладно визначити такі характеристики матеріалу, як: границю міцності при згинанні  $\sigma_B^{зг}$ , умовну границю текучості при згинанні  $\sigma_{0,2}^{зг}$ , повний угин  $f^{зг}$  та ін.

Границя міцності при згинанні для циліндричних зразків записується у

вигляді:

$$\sigma_e^{\text{зг}} = \frac{8 l P_{\text{max}}}{\pi d_0^3} \quad (7.1)$$

$$\sigma_e^{\text{зг}} = \frac{3 l P_{\text{max}}}{2 b h^2} \quad (7.2)$$

де  $P_{\text{max}}$  – максимальне навантаження, Н;  $l$ ;  $h$ ;  $b$ ;  $d_0$  – довжина, товщина, ширина і діаметр зразка, мм.

Необхідну для розрахунку границю міцності при згинанні  $P_{\text{max}}$  зразка можна визначити по показанню силвимірювача випробувальної установки (контрольна стрілка дозволяє дуже точно зафіксувати максимальне зусилля) або за діаграмою згинання з урахуванням прикладеного попереднього навантаження.

При проведенні досліджень міцності покриттів на згинання може бути використана установка, схема якої подана на рис. 7.2.

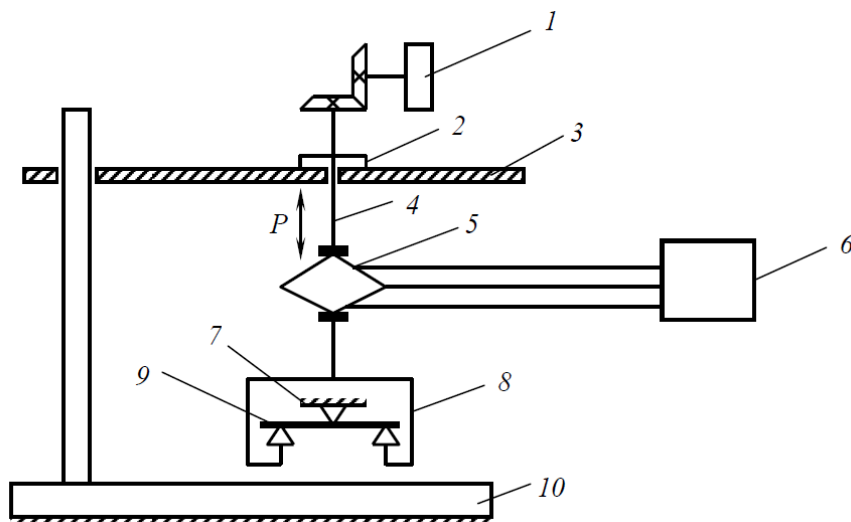


Рисунок 7.2 – Схема установки для дослідження міцності покриттів на згинання:

- 1 – мотор-редуктор; 2 – гайка; 3 – опорна пластина; 4 – гвинт;  
 5 – вимірювальний елемент; 6 – вторинний прилад; 7 – нерухома опора;  
 8 – рухома рамка; 9 – рухома опора; 10 – стіл

Випробуваний зразок встановлюється на активні опори 9. При вмиканні мотор-редуктора 1 і за рахунок руху нагору ходового гвинта 4 у гайці 2 відбувається переміщення рамки 8 з активними опорами. Випробуваний зразок входить в контакт із нерухомо закріпленою опорою-призмою 7. Вимір зусилля вигину забезпечується пружним елементом 5. При розтягненні пружного елемента сигнал від тензодатчиків надходить через підсилювач на прилад КСП-4 і фіксується на діаграмній стрічці,



швидкість руху якої можна змінювати в межах від 20 до 5400 мм/год. Зразки мають вигляд пластин з покриттям з однієї сторони.

Якщо немає пристосування для безперервної реєстрації діаграми згинання, то процес можна фіксувати по точках, за допомогою індикатора годинникового типу (точність відліку не менше 0,01 мм), ступінчасто прикладаючи навантаження і фіксуючи відповідні їм величини повного прогину за шкалою індикатора.

Діаметр зразка за допомогою штангенциркуля потрібно виміряти із точністю до 0,1 мм.

### Необхідне обладнання, прилади і матеріали

1. Універсальна розривна машина з пристосуванням для дослідження на згинання.
2. Прилад для безперервної реєстрації діаграм вигину або індикатор годинникового типу (точність відліку не менше 0,01 мм).
3. Штангенциркуль, мікрометр.
4. Зразки плоскі для випробування на згинання.
5. Установка для напилення покриттів.
6. Матеріал для напилення.

Таблиця 7.1 Результати вимірювання та розрахунків

№ зразка	Матеріал покриття	Навантаження, $P$ , Н	$l$ , мм	$b$ , мм	$h$ , мм	$\sigma_{\epsilon}^{3\Gamma}$ , МПа

### Порядок виконання роботи

1. На абразивно-струменевій установці провести підготовку поверхні зразків для напилення.
2. Запустити установку для напилення і напилити зразки
3. Встановити зразок спочатку без покриття, а потім із покриттям на випробувальну установку і провести дослід.
4. Записати результати випробувань і розрахунків за формулою (10.1) у табл. 7.1.
5. Випробування провести на трьох зразках без покриття і на трьох зразках з покриттям.
6. Випробування провести для різних покриттів.

### Вимоги до звіту по роботі

1. Привести мету роботи.
2. Дати короткий опис обладнання, яке використовувалося у роботі.
3. Описати порядок виконання роботи.
4. Заповнити таблицю.
5. Висновки по роботі.

### **Контрольні питання**

1. Яке випробувальне обладнання використовується для випробування на згин?
2. Як впливає наявність покриття на характеристики композиційного матеріалу?
3. Які особливості випробувань на згин порівняно з випробуваннями на розтяг?
4. Які показники випробувань пов'язані з відшаруванням і розтріскуванням покриттів?

### **Рекомендована література**

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская. – К. : Наукова думка, 1987. – 544 с.