

Міністерство освіти і науки України
Вінницький державний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни

"Основи інженерії поверхні деталей машин і механізмів"

для студентів бакалаврського напрямку - **6.0923** - "Зварювання"

спеціальності - **7.092303** – "Технологія і устаткування відновлення та

підвищення зносостійкості машин і конструкцій"

Міністерство освіти і науки України
Вінницький державний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
"Основи інженерії поверхні деталей машин і механізмів"
для студентів бакалаврського напрямку - 6.0923 - "Зварювання"
спеціальності - 7.092303 – "Технологія і устаткування відновлення та
підвищення зносостійкості машин і конструкцій"

Затверджено
на засіданні кафедри ТПЗ
Протокол 10 від 12 лютого 2002 р.

Вінниця ВДТУ 2002

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Основи інженерії поверхні деталей машин і механізмів" для студентів бакалаврського напрямку - 6.0923 - "Зварювання" спеціальності - 7.092303 – "Технологія і устаткування відновлення та підвищення зносостійкості машин і конструкцій" /Уклад. А. Ю. Осадчук, О. П. Шиліна - Вінниця: ВДТУ, 2002. - 27 с.

Методичні вказівки містять 6 лабораторних робіт, які в значній мірі охоплюють курс лабораторного практикуму дисципліни "Основи інженерії поверхні деталей машин і механізмів". Виконання лабораторних робіт дозволить студентам отримати знання фізичних процесів та практичні навички отримання покриттів, які стануть у нагоді для їх наступного використання у курсовому, дипломному проектуванні та майбутній інженерній діяльності.

Укладачі: Андрій Юрійович Осадчук
Олена Павлівна Шиліна

Редактор В. О. Дружиніна
Коректор З. В. Поліщук

Відповідальний за випуск зав. каф. ТПЗ Михалевич Володимир
Маркусович

Рецензенти: І. О. Сивак, доктор технічних наук, професор
Р. Д. Іскович-Лотоцький, доктор технічних наук,
професор

ЗМІСТ

Лабораторна робота №1

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОРОШКОВОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ
НАПИЛЕННІ 4

Лабораторна робота №2

ВИВЧЕННЯ ТЕКСТУРИ ПОКРИТТІВ ТА БУДОВИ ПЕРЕХІДНОЇ ЗОНИ
МІЖ ПОКРИТТЯМ І ОСНОВОЮ 7

Лабораторна робота №3

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТАКТНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАСТИНКАМИ ПРИ
ФОРМУВАННІ ПОКРИТТІВ 10

Лабораторна робота №4

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОКРИТТІВ, ОТРИМУВАНИХ У
ВАКУУМІ 14

Лабораторна робота №5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ НАПИЛЕННЯ НА РОЗМІР
ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ У СИСТЕМІ “ОСНОВА-ПОКРИТТЯ” 17

Лабораторна робота №6

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ТА ФОРМИ ФІГУРИ НАПИЛЕННЯ 22

ЛІТЕРАТУРА..... 26

Лабораторна робота №1

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОРОШКОВОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ НАПИЛЕННІ

Мета роботи: експериментально визначити температуру частинок матеріалу і встановити вплив на неї режимних параметрів розпилювача.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Технологічна підготовка виробництва деталей з покриттям може бути значно полегшена, якщо контролювати температуру частинок матеріалу при формуванні покриття. Існує кілька контактних методів вимірювання температури. Один з них полягає в напиленні частинок матеріалу на зразок, а потім калориметрування зразка й покриття разом. Недоліком цього методу є необхідність другого вимірювання для визначення нагрівання зразка струменем без порошку. Виникає також похибка через неврахування різниці в нагріванні зразка разом із частинками і без них. Цей метод не дозволяє також визначити локальну температуру частинок. Указаних недоліків можна позбавитись шляхом відокремлення частинок порошку від газу і калориметрування тільки нагрітих частинок.

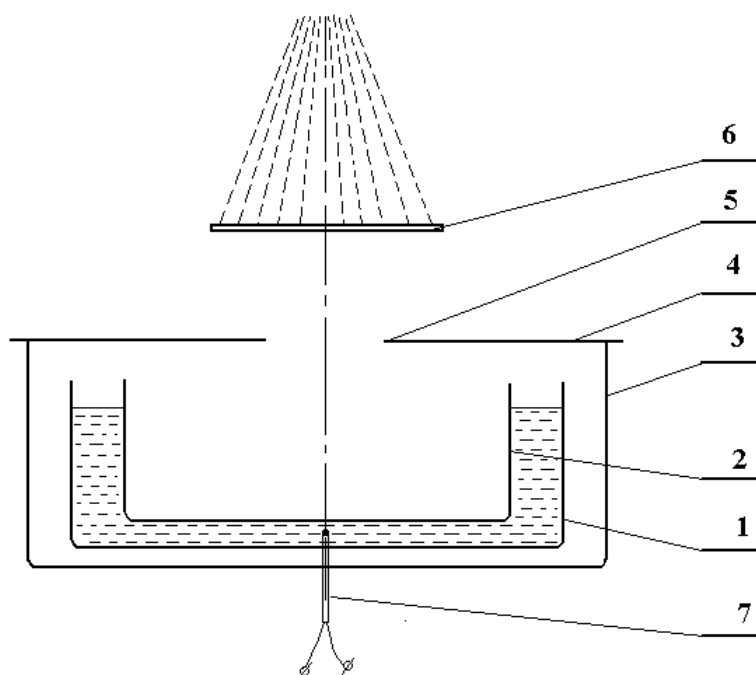


Рисунок 1.1 - Схема калориметра

Для визначення температури порошкового матеріалу використовують спеціальний калориметр, схему якого показано на рис. 1.1. Корпус калориметра 1 виготовлений зі сталі з відомою теплоємністю і розміщено в циліндричному кожусі 3, який закритий кришкою 4 із центральним отвором 5. В порожнину корпусу налита

дистильована вода, в яку занурений мідний стакан 2. В неробочому стані отвір 5 закритий рухомим стаканом 6. Температура води в порожнині корпусу 1 вимірюється температурою 7. Вимірювання здійснюється таким чином: кожух калориметра 3 із корпусом 1 встановлюється під розпилувачем так, щоб осі калориметра і сопла розпилувача збігалися. В порожнину корпусу 1 заливається відома кількість води і вставляється попередньо зважений стакан 2. Кожух 3 закривається кришкою 4. Екраном 6 закривається отвір 5. Вмикається установка напилення, подається матеріал, що напилюється.

Після виходу установки на потрібний режим відкривається отвір 5 переміщенням екрана 6 і частинки матеріалу вловлюються в стакан 2. Температура води в порожнині корпусу калориметра 1 вимірюється термопарою XK і фіксується на самописці.

В загальному випадку рівняння теплового балансу для калориметра:

$$Q_p = Q_k - \Delta Q_d + \Delta Q, \quad (1.1)$$

Де Q_p – кількість теплоти, яку містять частинки перед надходженням до калориметра; Q_k – кількість теплоти, яку сприйняв калориметр від частинок; ΔQ_d – похибка визначення кількості теплоти через нагрівання калориметра високотемпературним струменем; ΔQ – сумарна похибка визначення кількості тепла в калориметрі через стікання тепла.

У свою чергу сумарна похибка складається з таких похибок:

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4 + \Delta Q_5, \quad (1.2)$$

Де ΔQ_1 – втрати теплоти в стінки корпусу калориметра; ΔQ_2 – втрати теплоти в термопарі; ΔQ_3 – втрати теплоти при пружному зіткненні частинок із стінками отвору калориметра; ΔQ_4 – втрати теплоти внаслідок відбиття частинок від днища і вилітання їх з калориметра; ΔQ_5 – втрати тепла частинками при їх русі в газі від верхньої поверхні кришки до днища стакана калориметра.

ΔQ_d – оцінена експериментально і не перевищує $0,02 Q_k$. Найбільша з перерахованих утрат є ΔQ_1 . Спеціальною конструкцією калориметра досягається швидкість нагрівання води за рахунок введення до нього гарячих частинок матеріалу 2 град/с , швидкість зниження температури води після закінчення введення частинок – $0,1 \text{ град/с}$. Таким чином похибка не перевищує 5%. Термопара, зроблена із дроту товщиною $0,2 \text{ мм}$ і не вносить суттєвої похибки через стоки теплоти до неї, внаслідок малої маси в порівнянні з масою стакана.

Кількість теплоти, яка сприймається калориметром від частинок:

$$Q_k = (C_b \cdot m_b + C_k \cdot m_k + C_c \cdot m_c) \cdot (t_2 - t_1), \quad (1.3)$$

де C_b, C_k, C_c – питомі теплоємності води, матеріалу стакана й матеріалу корпусу; m_b, m_k, m_c , відповідно їх маса; t_1, t_2 – температура води спочатку і в кінці експерименту.

Експериментальне значення питомої ентальпії частинок:

$$H_{pc} = Q_k/m_p,$$

де маса частинок у стакані (визначається зважуванням стакана до і після наплення). За відповідними графіками по H_{pc} визначається температура частинок.

НЕОБХІДНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПРИЛАДИ Й МАТЕРІАЛИ

1. Установа плазмового наплення
2. Калориметр із схемою вимірювань.
3. Терези аналітичні.
4. Дистильована вода. Матеріал для наплення.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з конструкцією приладу для вимірювання температури частинок, правилами техніки безпеки при роботі на установках та переконатися в готовності обладнання до роботи.
2. Скласти план експерименту згідно із завданням викладача.
3. Зважити стаканчик і встановити його в калориметр.
4. Увімкнути установку, встановити потрібні режимні параметри.
5. Провести вимірювання температури води в стакані при стаціонарному режимі наплення.
6. Вимкнути установку. Розібрати калориметр. Зважити стаканчик із порошком.
7. Результати занести до таблиці 1.1.
8. Повторити пп. 3, 4, 5, 6, 7 для інших матеріалів або режимних параметрів згідно з планом експерименту. Вимкнути установку.

Таблиця 1.1

Маса стакана з порошком, <i>г</i>	Температура води, <i>град</i>	Режимні параметри				
		1	2	3	4	5

ВИМОГИ ДО ЗВІТУ ПО РОБОТІ

1. Мета роботи.
2. Дати опис обладнання та інструментів, що були використані в роботі.
3. Описати порядок виконання роботи. Заповнити таблицю 1.1.
4. Розрахувати питому ентальпію за формулою 1.4 і визначити температуру частинок матеріалу, що напнюється.

5. Побудувати залежності температури від режимних параметрів процесу напилення.
6. Висновки по лабораторній роботі.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які існують методи вимірювання температури частинок матеріалу при напиленні? Їх переваги й недоліки.
2. Які можливі причини похибки вимірювань у методі, що використаний у лабораторній роботі?
3. Як залежить температура частинок від режимних параметрів процесу?
4. Які припущення прийняті при вимірюванні температури за питомою ентальпією?
5. Як можна використати одержану інформацію про температуру частинок при відпрацюванні технології напилення?

Лабораторна робота № 2

ВИВЧЕННЯ ТЕКСТУРИ ПОКРИТТІВ ТА БУДОВИ ПЕРЕХІДНОЇ ЗОНИ МІЖ ПОКРИТТЯМ І ОСНОВОЮ

Мета роботи: навчитися якісно аналізувати структуру покриттів, робити порівняльний аналіз пористості, виявляти наявність оксидних включень і на основі якісного аналізу прогнозувати службові якості покриттів.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При газотермічному напиленні покриття утворюється з окремих розплавлених або близьких до цього стану частинок: 1) рідких; 2) тих, що мають рідку оболонку і твердий kern; 3) суміші рідких і твердих частинок; 4) суміші рідких, твердих і розплавлених із поверхні частинок.

Послідовно осідаючи одна на одну, частинки утворюють лускате шарувате покриття із сильною анізотропією фізичних і механічних властивостей, неоднорідне в хімічному й структурному відношенні, із розвинутою поверхнею стиків між частинками і значною кількістю оксидних включень (рис. 2.1).

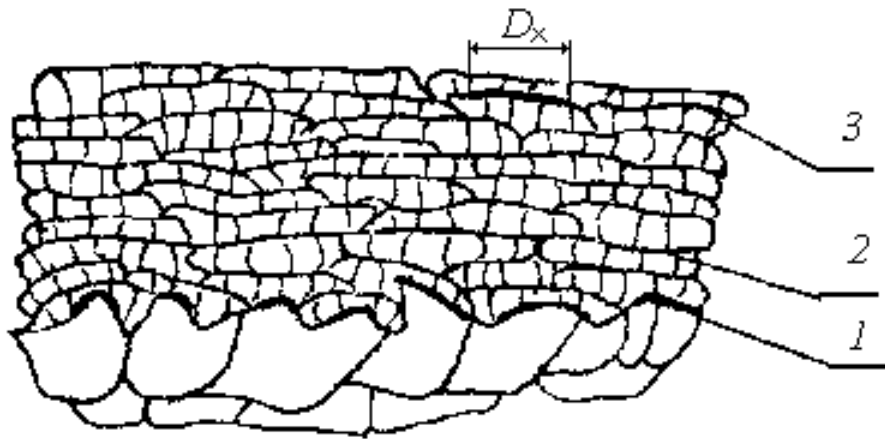


Рисунок 2.1 - Схема структури покриття.

1 - межа між покриттям і основою; 2 - межа між шарами; 3 - границя (контактна поверхня) між частинками; D_x - діаметр ділянки поверхні контакту, на якому трапилось приварювання частинки

Практична взаємна незалежність поведінки частинок на основі обмежує механізм утворення покриття теплофізичними й фізико-хімічними явищами при ударі, кристалізації й твердненні. Покриття в цілому можна уявити як матеріал, що складається з тонких пластинок. Пластинки з'єднані між собою по контактній поверхні зварними ділянками або ділянками "схоплювання" площею F_x , які утворились за час тверднення частинок. Зварні ділянки не заповнюють всю площу контакту між частинками, тому міцність і густина матеріалу покриття нижче міцності й густини компактного матеріалу. При нанесенні покриття мають місце два характерних випадки взаємодії:

- 1) між частинками, що напилюються і поверхнею основи;
- 2) між частинками, що напилюються і вже нанесеним покриттям.

В реальному покритті можна виділити ряд структурних елементів, які розділяються границями розділу з визначеними властивостями. Границя розділу між покриттям і основою (1) визначає міцність зчеплення між ними. Границя розділу між шарами, що отримані за один прохід розпилювача (2), виникає через різну тривалість витримки між нанесенням частинок у шарі і між шарами. За період витримки міжшарового нанесення, поверхня покриття забруднюється і контактні процеси під частинками ускладнюються. Друга причина появи цих границь - різниця в термоциклах, які залежать від теплопровідності покриття, що сильно змінюється через зростання його товщини. До границі розділу між частинками в шарі (3) входить площа контактної поверхні, в місцях схоплювання, на яких окремі частинки приварювались до основи або покриття. Ділянки приварювання визначають насамперед механічні властивості покриттів.

Будова шару, що формується за один прохід, неоднорідна й визначається різним енергетичним станом (температурою й швидкістю)

частинок, які знаходяться в центральній і периферійній зонах двофазного потоку. Крім того, має місце екрануюча дія периферійних частинок по відношенню до частинок центральної зони. Товщина шару покриття, яке нанесене за один прохід, в залежності від продуктивності процесу, швидкості взаємного переміщення деталі й розпилувача, термічних умов на основі й інших режимних параметрів процесу може досягати 50 - 100 *мкм*.

Умови створення границь між шарами відрізняються від умов створення границь між частинками передусім тривалістю перебування в атмосфері. "Пауза" між моментами накладання шарів може досягати секунд і десятків секунд. Цей час на кілька порядків перевищує час паузи між взаємодією частинок у шарі, що нанесений за один прохід. На поверхні основи або в покритті, що вже нанесене, у проміжку часу між напиленням шарів проходить адсорбція газів і відкладаються пилоподібні фракції матеріалу, що розпилується, або його оксидів.

Утворення покриття послідовним укладанням великої кількості частинок, що деформуються, неминуче веде до появи мікропорожнин, особливо на стиках частинок. У зв'язку з тим, що покриття формується в атмосфері, мікропорожнини заповнюються і газом. Особливо це впливає на властивості міжшарових границь, які мають найбільшу товщину адсорбованих газів. Внаслідок великої шорсткості покриття і надто швидкого розтікання і кристалізації частинок при ударі, в зоні контактів із поверхнею раніше нанесених частинок зостаються дефекти й порожнини. Взаємодія з атмосферою, адсорбція газів і осідання пилоподібних фракцій суттєво погіршує властивості міжшарової зони покриття.

Із зменшенням розміру частинок, що напилюються, покращується заповнення шару покриття, його густина зростає, об'єм мікропорожнин зменшується, структура покриття робиться більш однорідною.

НЕОБХІДНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПРИЛАДИ Й МАТЕРІАЛИ

1. Зразки основи з листового матеріалу Ст 3. товщиною 3 - 4 *мм*, розміром 60 x 60 *мм*.
2. Матеріал для напилення.
3. Набір інструментів і пристосувань для виготовлення мікрошліфів.
4. Металографічний мікроскоп.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Підготувати для напилення зразки із Ст 3. (обробити на абразиво-струменевій установці).
2. Нанести покриття товщиною 0.4 - 0.5 *мм*.
3. Виготовити мікрошліфи.
4. Дослідити текстуру покриття на оптичному мікроскопі.

5. Змінити режимні параметри згідно із завданням викладача. Повторити пп. 2, 3, 4.

ВИМОГИ ДО ЗВІТУ ПО РОБОТІ

1. Мета роботи.
2. Дати короткий опис обладнання й пристосувань, які були використані у роботі.
3. Викласти технологію виготовлення мікрошліфів.
4. Дати опис текстури покриттів на мікрошліфах. Виявити залежність структури матеріалу й будови перехідних зон від фракційного складу матеріалу, що напилюється, і режимних параметрів розпилювача.
5. Висновки по лабораторній роботі.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Який механізм утворення міцного зв'язку покриття з основою?
2. Що є основною причиною пористості газотермічних покриттів?
3. Які шляхи зменшення пористості й збільшення міцності зчеплення покриття з основою?
4. Яка вірогідність взаємного термічного впливу частинок при формуванні покриття?
- 5 Чи є обмеження на розмір частинок, що можуть утворювати покриття?

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТАКТНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАСТИНКАМИ ПРИ ФОРМУВАННІ ПОКРИТТІВ

Мета роботи: Установити вплив рівня енергії системи частинка-основа на, міцність зчеплення покриття з основою. Ознайомитись із зовнішнім виглядом поверхні взаємодії після видалення частинки від основи.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При ударі об поверхню основи сферичні частинки діаметром d (рис. 3.1) сильно деформуються, твердіють і, в ідеалі, набувають форму тонкого диску розміром $D \times h$.

Висока швидкість деформації й розтікання розплавлених частинок приводить до фізичного контакту матеріалу частинки й основи на границі взаємодії. При цьому велика група збуджених атомів частинки, що в рівній мірі підготовлена до хімічної взаємодії, входить у стикання з атомами основи.

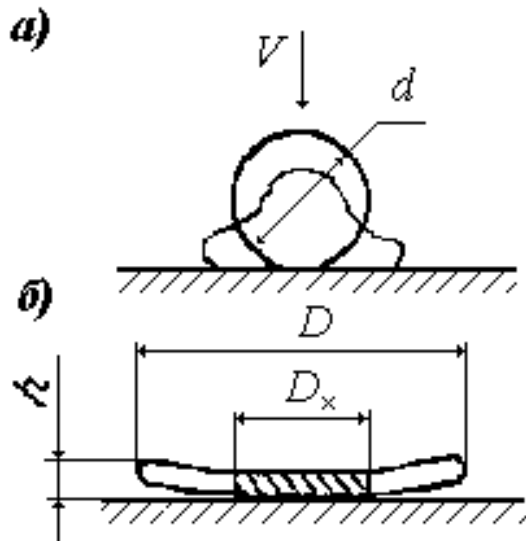


Рисунок 3.1 - Схема деформування частинки при ударі об плоску поверхню основи

При наданні атомам основи деякої енергії (енергії активації) вони будуть хімічно взаємодіяти з атомами частинки. Це проявляється в приварюванні частинок на площі плями хімічної взаємодії діаметром D_x . Міцне приварювання частинки до основи має місце тільки при підігріванні основи до певної температури, що відповідає заповненню контактної поверхні під частинкою осередками захоплення на 40 - 70 %. При підвищенні температури контакту частинки з основою одночасно йдуть два процеси: розширення діаметра плями D_x , на якому частинка приварюється до основи й збільшення міцності в самій плямі (за рахунок збільшення кількості осередків захоплення в ній). Граничним випадком для першого процесу є приварювання частинки по всій площі $D_x/D=1$, для другого - отримання міцності зчеплення, яка відповідає деякій максимальній величині, що близька до міцності металів, що з'єднуються.

Існує методика дослідження міцності зчеплення окремих частинок з основою шляхом зрізання за допомогою спеціального мікроножа (рис. 3.2) Частинки попередньо наносять на полірований торець циліндричного зразка діаметром 10 - 15 мм і довжиною 15 - 20 мм. Мікроніж підводять під частинку, і шляхом поступового збільшення навантаження F відокремлюють її від основи. Орієнтація ножа відносно частинки здійснюється маніпулятором. Спостереження за процесом ведеться через лупу. Вимірюючи F_x і, визначивши за допомогою мікроскопа величину D_x , знаходять площу плями:

$$S_x = \pi \cdot D_x^2 / 4, \quad (3.1)$$

Тоді напруження:

$$\sigma = 4F / \pi D_x^2, \quad (3.2)$$

Методика має ряд суттєвих недоліків:

- при навантаженні частинки силою F виникає додатковий момент, що порушує схему чистого зрізу;
- існує значна похибка вимірювання розмірів плями хімічної взаємодії D_x .

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Підготувати для напilenня зразки і порошковий матеріал (пару матеріалів вибрати згідно з літературними даними, виходячи із принципової можливості між ними хімічної взаємодії, наприклад, $Al-Al$, $Al-Ni$, $Ag-Cu$, $Ag-Zn$, $Al-Mo$ і т.і).
2. На мінімальній продуктивності порошкового дозатора протягом 2 секунд наносити покриття на полірований торець основи. Рекомендована фракція порошку 150 - 200 мкм.
3. Режимні параметри процесу зафіксувати в таблиці 3.1.
4. Зрізати кілька частинок на приладі для зрізання. Параметри процесу занести до таблиці 3.1.
5. Розрахувати за формулами (3.1) - (3.2) значення σ .

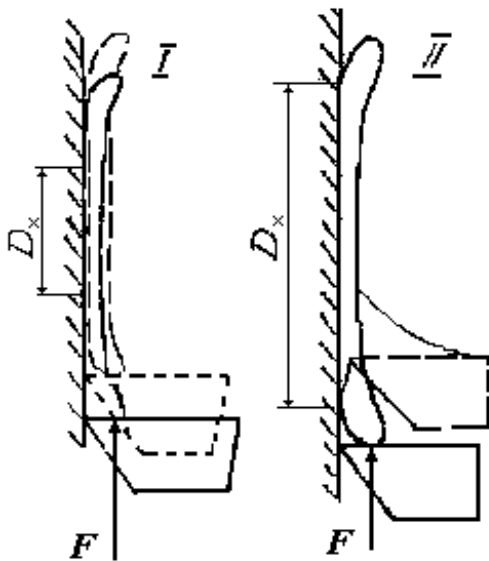


Рисунок 3.2 - Схема навантаження силою F при зрізанні частинки з основи
I - відділення частинки від основи по всій площині взаємодії; *II* - змінення і зрізання частинки при міцності зчеплення, яка близька до максимальної величини.

6. За формулою: $\sigma/\sigma_p = 4F/\pi D^2 \cdot \sigma_p$ розрахувати відносну міцність зчеплення частинок.
7. Змінити режимні параметри процесу нанесення покриття для зміни умов взаємодії частинки з основою (змінити температуру або швидкість частинок).

8. Повторити пп. 2, 3, 4, 5, 6. Порівняти отримані результати з результатами попереднього експерименту

Таблиця 3.1

Q , $m^3/год$	I , A	U , B	n , $\%$	L , $мм$	d , $мм$	Тип матеріалу покриття	D , $мм$	F , H	S , $мм^2$	σ , $МПа$	σ_p , $МПа$

ВИМОГИ ДО ЗВІТУ ПО РОБОТІ

1. Мета роботи.
2. Дати короткий опис обладнання й пристосувань, що використовувались в роботі.
3. Викласти методику досліджень і заповнити таблицю 3.1.
4. Описати загальний вигляд поверхні контакту частинки з основою (за результатами візуального спостереження).
5. Зробити порівняльний аналіз двох варіантів розвитку процесу взаємодії (при різному рівні енергії системи основа-покриття).
6. Висновки по лабораторній роботі.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Якими силами забезпечується зчеплення частинок з основою при формуванні покриття?
2. В чому проявляється хімічна взаємодія матеріалів основи й покриття?
3. Які шляхи підвищення міцності зчеплення покриття з основою?
4. Як впливає на розвиток контактних процесів швидкість частинок, їхня температура?
5. Як впливає на процес приварювання частинок наявність оксидних плівок на поверхні металів?
6. В яких випадках допустиме підвищення контактної температури за рахунок підвищення температури основи?

Лабораторна робота №4

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОКРИТТІВ, ОТРИМУВАНИХ У ВАКУУМІ

Мета роботи - вивчити закономірності утворення структури вакуумних покриттів і можливості її регулювання.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Основними факторами, що впливають на структуру вакуумних покриттів, є температура поверхні основи, енергія напилюваних частинок і природа напилюваного матеріалу. Найважливішим фактором є температура поверхні основи. Залежно від температури поверхні основи формується три типи структури покриттів, які можуть бути представлені з допомогою трizonної моделі структури (рис. 4.1)

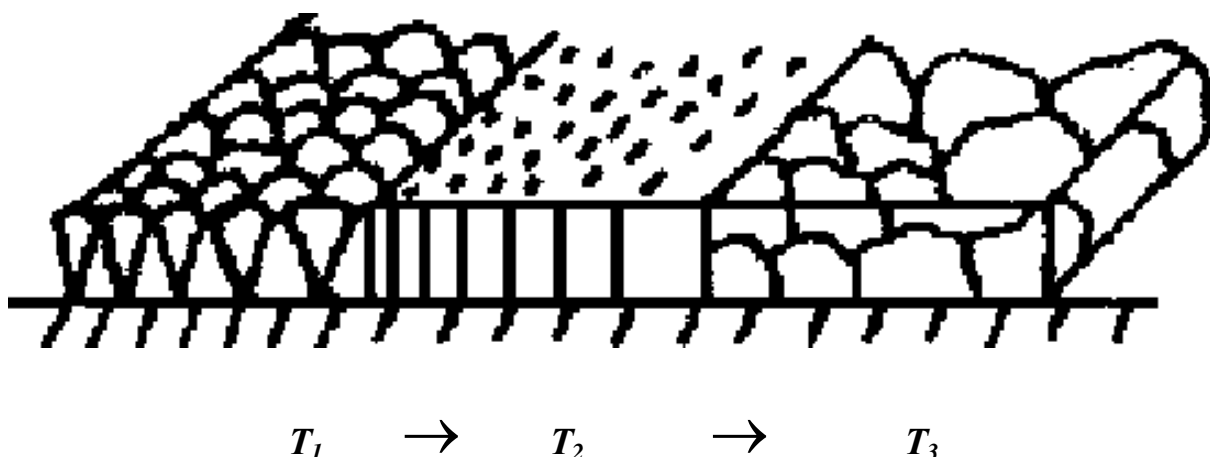


Рисунок 4.1 - Схема трizonної структури вакуумних покриттів.

При низьких температурах поверхні основи (починаючи від кімнатної) формується покриття з конусоподібною у перерізі й куполоподібною формами кристалів на поверхні покриття. Підвищення температури поверхні основи призводить до збільшення діаметра куполоподібних кристалів. Така структура покриттів спостерігається до деякої температури $T_1 \approx 0.3T_{nl}$ матеріалу покриття. Подальший нагрів основи призводить до того, що замість куполоподібних починають утворюватись стовпчасті кристали. Діаметр їх збільшується з підвищенням температури основи. Покриття зі стовпчастою структурою формуються до деякої температури $T_2 \approx (0.45...0.5)T_{nl}$ напилюваного матеріалу. За цієї температури знову спостерігається якісна зміна структури покриттів замість стовпчастих утворюються крупні рівновісні кристали.

Для покриттів, що одержані у першій структурній зоні, характерна висока дефектність структури, а в об'ємах, що примикають до поверхні основи, наявна значна мікропористість. Висока дефектність структури

обумовлює високі механічні властивості самого покриття, але наявність мікропористості на поверхні розділу, спричинює низьку міцність зчеплення покриття з основою.

Покриття, що одержані у другій структурній зоні, мають меншу дефектність структури і в них майже відсутня мікропористість. Тому такі покриття мають меншу твердість і міцність на розрив, але більшу пластичність і міцність зчеплення покриття з основою.

Покриття, що одержані в третій структурній зоні, мають ще менше дефектів і мікропор, тому вони ще більш пластичні і характеризуються найбільшою міцністю зчеплення з основою.

Розміри елементів структури покриттів - діаметри напівсфер, стовпчастих кристалів, рівновісних зерен - у кожній структурній зоні залежно від температури основи описуються експоненціальною залежністю вигляду:

$$D^2 = A \exp\left(-\frac{U}{RT}\right), \quad (4.1)$$

де U - ефективна енергія активації процесів формування кристалів; R - універсальна газова стала.

Як показують розрахунки, зроблені на підставі експериментальних даних, у першій структурній зоні U має дуже низькі значення, які набагато менші за значення енергії активації поверхневої самодифузії адсорбованих атомів. У другій структурній зоні U набуває значень, що близькі до значень енергії активації поверхневої самодифузії, а в третій структурній зоні U має значення приблизно рівня енергії активації об'ємної самодифузії сконденсованих атомів. Ця інформація про енергію активації дозволяє розкрити механізм формування структури покриттів у кожній структурній зоні.

Низькі значення енергії активації, характерні для першої структурної зони, можна ототожнити зі значеннями енергії активації переходу атомів між двома сусідніми положеннями рівноваги на поверхні. Не одержуючи додаткової енергії від холодної поверхні основи, атоми завдяки деякому запасу своєї внутрішньої енергії мають змогу зробити лише кілька таких переходів. Реалізація таких переходів приводить до появи куполоподібних зародків конденсації. Оскільки поверхнева дифузія відсутня, то ріст зародків відбувається завдяки прямому захвату атомів із парової фази. Атоми на зародок потрапляють із деякого тілесного кута, тому кристали ростуть у формі конуса, причому первісна куполоподібна форма зародка зберігається і у кристала, що зростає.

У другій структурній зоні адсорбовані атоми отримують від нагрітої поверхні основи додаткову енергію, тому вони мають змогу вільно дифундувати по поверхні. Завдяки цьому зародки конденсації можуть дуже швидко рости по поверхні, приєднуючи до себе дифундуючі атоми. Поверхневий ріст зародків триває доти, доки вони не зіткнуться між

собою. Після цього відбувається формування другого шару і т.д. Таким чином, кожний зародок росте у вигляді окремого стовпчика. Об'ємна дифузія атомів при цьому відсутня, тому границі між стовпчиками зберігаються, бо вони мають дефектність кристалічної будови.

У третій структурній зоні атоми покриття отримують від основи стільки додаткової енергії, що мають змогу здійснювати не лише поверхневу, але й об'ємну дифузію. Тому під впливом об'ємної самодифузії відбувається рекристалізація структури з утворенням крупних рівноважних кристалів.

Якщо наносити покриття при температурі основи, близькій до T_2 , то у товстих покриттях нижній шар матиме рекристалізовану структуру, а верхній (більш холодний) - стовпчасту.

МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ

1. Установка вакуумного напилення.
2. Алюмінієвий дріт.
3. Мідні пластинки розміром 10 x 10 x 0.5 мм.
4. Металографічний мікроскоп.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Ознайомитися з порядком роботи установки. Провести напилення алюмінію на мідні пластинки (режими напилення задаються викладачем). Виготовити шліфи і провести мікроструктурний аналіз одержаних покриттів. Зарисувати ескізи структур. Одержані результати обговорити та зробити висновки по роботі.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які фактори впливають на структуру вакуумних покриттів?
2. Як змінюється структура покриттів залежно від температури основи?
3. Як змінюються властивості покриттів залежно від температури основи?
4. Як змінюється енергія активації процесів формування покриттів у різних зонах?

Лабораторна робота №5

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ НАПИЛЕННЯ НА РОЗМІР ВНУТРІШНІХ НАПРУЖЕНЬ У СИСТЕМІ “ОСНОВА-ПОКРИТТЯ”

Мета роботи - вивчити вплив різних факторів напилення на величину внутрішніх напружень, зви видихають на поверхні розділу "основа-покриття".

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Внутрішні напруження є наслідком термічних умов напилення, різниці у теплофізичних властивостях матеріалів покриття й основи, фазових перетворень та інших причин. Вони з'являються у процесі кристалізації та охолодження як окремих частинок, так і всього покриття в цілому.

У напилених покриттях виникають внутрішні напруження трьох видів, внутрішні напруження першого роду - виникають у макрооб'ємах покриття; внутрішні напруження другого роду - виникають у результаті локальних неоднорідностей і деформації в окремих частинках; внутрішні напруження третього роду - виникають в окремих зернах і є наслідком деформації кристалічної ґратки.

Напруження другого та третього родів викликані високими швидкостями охолодження частинок, які супроводжуються значними імпульсними навантаженнями при ударі їх об напилювану поверхню. Малий проміжок часу проходження цих процесів не дозволяє пройти процесам релаксації. Напруження цих двох типів врівноважуються в об'ємі частинок, що закристалізувалися, тому практично не викликають шкідливих наслідків у покриттях.

Напруження першого роду виникають через різницю коефіцієнтів термічного розширення матеріалу покриття α_n та матеріалу основи α_0 і поділяють на тимчасові (термічні) та постійні (залишкові).

Тимчасові напруження діють лише протягом нагріву або охолодження виробу і виникають через різницю температурних залежностей коефіцієнтів термічного розширення основи та покриття. Наприклад, при кімнатній температурі коефіцієнти термічного розширення покриття й основи можуть бути приблизно однаковими, але при нагріванні у покритті й основі виникають суттєві напруження. Це викликано незбігом ходу кривих розширення покриття та основи. Тимчасові напруження переходять у постійні, якщо після охолодження система не повертається до стану рівноваги.

Постійні напруження пов'язані з постійною різницею у коефіцієнтах термічного розширення покриття та основи, що зберігаються за будь-яких температур.

Внутрішні напруження призводять до зниження міцності зчеплення і швидкого руйнування покриттів, особливо у місцях із малим радіусом заокруглення на зовнішніх поверхнях.

Якщо $\alpha_n > \alpha_0$, то при охолодженні основа стискається у меншій мірі й покриття знаходиться під дією напружень розтягування. Якщо $\alpha_n < \alpha_0$, то покриття знаходиться під дією напружень стискання. Напруженням розтягування прийнято приписувати знак «+», а напруженням стискання «-». При напруженнях стискання, які перевищують допустимі значення, покриття відстають від рівної або вигнутої основи, а при напруженнях розтягування в них виникають тріщини. Разом із тим, напруження стискання більш прийнятні порівняно з напруженнями розтягування, оскільки матеріали, особливо оксидні, мають більш високу міцність на стискання, ніж на розтягування.

Для тіл простої форми (циліндр, пластина) напруження, які виникають через різницю коефіцієнтів термічного розширення покриття й основи, можуть бути обчислені з використанням положень теорії термопружності. Так, для пластини напруження δ_n , що виникають у покритті вздовж поверхні розділу "покриття - основа", виражаються рівнянням:

$$\sigma_n = \frac{(\alpha_n - \alpha_0)\Delta T}{\frac{h_n}{h_0} \frac{1 - \mu_0}{E_0} + \frac{1 - \mu_n}{E_n}} \quad (5.1)$$

де α_n та α_0 - коефіцієнти термічного розширення відповідно покриття та основи; ΔT - різниця між температурою твердіння покриття та кімнатною або робочою температурою; h_n та h_0 - товщина відповідно покриття та основи;

E_n та E_0 модуль пружності відповідно покриття та основи.

Напруження в основі мають зворотний знак і пов'язані з напруженнями у покритті співвідношенням:

$$\sigma_0 = -\sigma_n \frac{h_n}{h_0} \quad (5.2)$$

або

$$\sigma_0 = \frac{(\alpha_n - \alpha_0) \cdot \Delta T}{\frac{1 - \mu_0}{E_0} + \frac{h_0}{h_n} \cdot \frac{1 - \mu_n}{E_n}} \quad (5.3)$$

Таким чином, на залишкові напруження впливають механічні властивості основи та покриття, їх товщини та різниця температур.

Існує кілька способів регулювання напружень у напилених покриттях:

1) вибір матеріалів основи та покриття з близькими коефіцієнтами термічного розширення;

2) регулювання термічного впливу газового струменя зміною дистанції напилення, швидкості переміщення плями напилення, застосуванням системи охолодження основи та екранування високотемпературного струменя;

3) зменшення модуля пружності матеріалу покриття, наприклад за рахунок введення добавок пластичного компонента;

4) використання багат шарових і градієнтних покриттів, що забезпечують повільну зміну властивостей матеріалу покриття;

5) вибір товщини покриття, що забезпечує допустимий рівень напружень;

6) армування матеріалу покриття безперервними або дискретними волокнами чи дротом;

7) зміна форми поверхні, що напиляється. Експериментально розмір напружень в основі може бути оцінений за прогином тонкої пластини з покриттям:

$$\delta_0 = \frac{1}{6h_n(h_n + h_0)} \left(\frac{E_n h_n^3}{1 - \mu_0^2} + \frac{E_0 h_0^3}{1 - \mu_0^2} \right) \frac{1}{\rho} \quad (5.4)$$

де ρ - радіус кривини пластини з покриттям,

$$\rho = 0.125 \frac{l^2}{S - S_0} - 0.167(S - S_0) \quad (5.5)$$

l - довжина пластини;

S - стріла прогину пластини після напилення; S_0 - початкова стріла прогину.

МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ

1. Установка для напилення.
2. Сталева пластина розміром 130x10x1 мм.
3. Штангенциркуль.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

За заданими вихідними даними розрахувати величини напружень у покритті та основі за (5.1) - (5.3). Після струменево-абразивної обробки однієї сторони сталеві пластини, виміряти товщину пластини h_0 . У разі жолоблення пластини виміряти значення стріли прогину S_0 . Підготувати до роботи установку УПУ-ЗД. Установити пластину для нанесення покриття. Увімкнути установку і встановити заданий режим роботи. Після закінчення напилення покриття і охолодження пластини виміряти штангенциркулем товщину пластини з покриттям ($h_0 + h_n$) та стрілу

прогину пластини з покриттям S . За одержаними даними вимірювань обчислити величину радіуса кривини за (5.5) і напружень у пластині після напилення покриттів (5.4). Результати записати у таблицю. Порівняти практичні та теоретичні значення величин напружень. Обговорити одержані результати та зробити висновки.

Таблиця 5.1 – Властивості матеріалів покриття

Матеріал	$E \cdot 10^{-10}, \text{Па}$	μ	$\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$
<i>Al</i>	7.1	0.34	26.1	660
<i>W</i>	3.9	0.29	4.5	3380
<i>Cu</i>	12.3	0.35	17.8	1083
<i>Pb</i>	1.6	0.44	27.5	327
<i>Ag</i>	7.9	0.37	20.1	960
Сірий чавун	10.8	0.22	10.0	1200
Сталь	20.6	0.28	13.5	1500
ZrO_2	17.5	0.40	7.7	2690
Al_2O_3	36.0	0.40	6.8	2040

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які основні причини виникнення внутрішніх напружень у покритті при газотермічному напиленні?
2. Які види напружень виникають у газотермічних покриттях?
3. Як впливають внутрішні напруження на силу зчеплення покриття з основою?
4. Як можна впливати на внутрішні напруження газотермічних покриттів?

Таблиця 5.2 – Вихідні дані та умови експерименту до лабораторної роботи

Номер варіанта	Умови розрахунку				Умови експерименту	
	Основа	Покриття	h_0 , мм	$h_в$, мм	Дистанція напилення	Струм I , A
1	2	3	4	5	6	7
1	Сталь	<i>Al</i>	1	0.3	100	400
2		<i>W</i>	1	0.3	100	400
3		<i>Cu</i>	1	0.3	100	400
4		<i>Pb</i>	1	0.3	100	400
5		<i>Ag</i>	1	0.3	100	400
6		<i>Al</i>	1	0.3	150	500
7		<i>W</i>	1	0.3	150	500
8		<i>Cu</i>	1	0.3	150	500
9		<i>Pb</i>	1	0.3	150	500
10		<i>Ag</i>	1	0.3	150	500
11	Сірий чавун	<i>Al</i>	1	0.3	100	400
12		<i>W</i>	1	0.3	100	400
13		<i>Cu</i>	1	0.3	100	400
14		<i>Pb</i>	1	0.3	100	400
15		<i>Ag</i>	1	0.3	100	400
16		<i>Al</i>	1	0.3	150	500
17		<i>W</i>	1	0.3	150	500
18		<i>Cu</i>	1	0.3	150	500
19		<i>Pb</i>	1	0.3	150	500
20		<i>Ag</i>	1	0.3	150	500
21	Сталь	Al_2O_3	1	0.3	100	400
22		ZrO_3	1	0.3	100	400
23		Al_2O_3	1	0.3	150	500
24		ZrO_3	1	0.3	150	500
25		Al_2O_3	1	0.3	100	400
26		ZrO_3	1	0.3	100	400
27		Al_2O_3	1	0.3	150	500
28		ZrO_3	1	0.3	150	500

Лабораторна робота №6

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ТА ФОРМИ ФІГУРИ НАПИЛЕННЯ

Мета роботи - навчитися експериментальне визначати розмір та форму фігури напилення та вивчити вплив на неї режимних та конструктивних параметрів розпилювача.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Дозвукові розпилювачі генерують, як правило, турбулентний струмінь, для якого температура й швидкість газу швидко зменшуються як з віддаленням від зрізу сопла в осьовому напрямку, так і в кожному перерізі потоку при переміщенні від осі в радіальному напрямку. В плазмових розпилювачах практично відсутня початкова ділянка струменя з постійними значеннями температури, швидкості й ентальпії газу. В результаті область ефективного нагріву та прискорення матеріалів за зрізом сопла різко обмежена як у радіальному так і в осьовому напрямку. Для кожної точки потоку частинок різниця температури й швидкості від частки до частки може досягати і навіть перевищувати 500 - 600 K та 50 - 80 м/с відповідно.

Спостерігається тенденція зниження середньої температури й швидкості частинок дисперсної фази від осі потоку до периферії. Таким чином для газодисперсного потоку, який генерується при напиленні, характерна суттєва неоднорідність стану частинок, яка носить статистичний характер і є наслідком неоднорідності гранулометричного складу порошку, умов його завантаження, а також неоднорідності самого потоку, в тому числі наявності турбулентних пульсацій його параметрів.

Неоднорідність умов завантаження потоку дисперсним матеріалом, а також його нагріву й прискорення неминуче приводить до неоднорідності умов формування покриття. Це найбільш чітко може бути виявлено при напиленні нерухомим розпилювачем на нерухому основу - в точку.

Вивчення топографії фігури напилення (металізаційної фігури) в умовах подачі дисперсного матеріалу через один отвір, який розміщений радіально під деяким кутом до осі потоку (найбільш поширена схема подачі дисперсного матеріалу), показує, що центр плями напилення - точка максимальної товщини фігури напилення, яка утворилась, не збігається з центром струменя. Кут між осями складає 1,2 - 2°. Тому із збільшенням дистанції напилення відстань між геометричними центрами струменя й плями напилення стає значною.

В перерізі фігура напилення несиметрична відносно центра плями, а її профіль у загальному випадку не може бути описаний нормальним розподілом Гауса. Але в разі розподіленої подачі матеріалу у високотемпературний струмінь і відсутності закрутки газу на виході із

сопла розпилювача, можна з деяким застереженням використовувати для опису форми перерізу фігури напилення Гаусову криву:

$$Y = y_0 \cdot e^{-\frac{r^2}{r_0^2}}, \quad (6.1)$$

де y - товщина покриття на осі фігури напилення; Y - відстань від осі фігури; r_0 - радіус розсіювання (звичайно приймають як відстань від центру плями на якій товщина покриття складає $0,05 y_0$).

Радіус розсіювання залежить від конструкції розпилювача й режиму напилення і визначається кутом розкриття двофазного потоку.

Величину y_0 можна визначити з виразу:

$$y_0 = G_n KBM / 1,77 \rho r_0 \omega_0, \quad (6.2)$$

де G_n - витрата порошку, $кг/с$; ρ - густина матеріалу порошку, $кг/м^3$; KBM - коефіцієнт використання матеріалу; ω_0 - швидкість лінійного переміщення розпилювача, $м/с$ (в нашому випадку ($\omega_0=0$)).

МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ

1. Устаткування для газотермічного напилення.
2. Порошки для напилення.
3. Сталеві пластинки розміром $100 \times 100 \times 3$ мм.
4. Штангенциркуль.
5. Лінійка металева вимірювальна.
6. Кронциркуль

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Скласти план експерименту згідно із завданням викладача.
2. Підготувати до роботи установку газотермічного напилення.
3. Просушити порошок і розділити його за фракціями менше 63 мкм, $63 - 100$ мкм, більше 120 мкм.
4. Засипати відому кількість потрібної фракції порошку до дозатора-живильника і протарувати його, визначивши продуктивність $у$ $г/с$ ($кг/с$).
5. Підготувати зразки, піддавши їх абразиво-струменевій обробці.
6. Ввімкнути установку. Установити згідно з планом експерименту необхідні режимні параметри і провести напилення. Час напилення фіксується й визначається шляхом візуального спостереження за ходом формування фігури напилення.
7. Змінити режимні параметри згідно з планом і здійснити напилення на інші пластини. Результати занести до таблиці 6.1.
8. Вимкнути установку.
9. Провести вимірювання розмірів фігури напилення для всіх зразків по товщині і в плані (рис. 6.2). За границю фігури прийняти точку, де товщина покриття складає $0,05 y_0$.

10. За результатами вимірювання побудувати графіки залежності $Y=f(r)$ для конкретних параметрів напilenня.

11. Розрахувати параметри фігури напilenня за формулою (6.1) і (6.2)

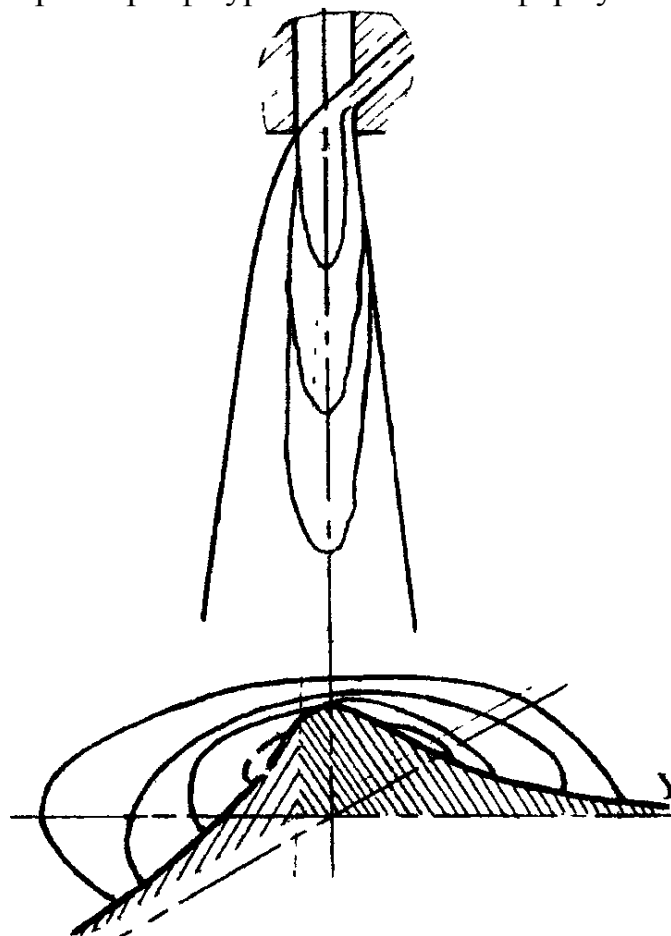


Рисунок 6.1 - Формування матеріалу, який напильється у нерухомій плямі

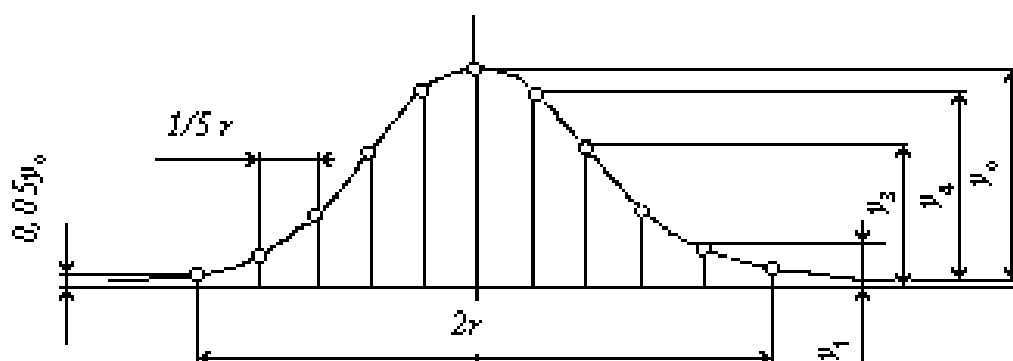


Рисунок. 6.2 - Точки вимірювання розмірів фігури напilenня.

Таблиця 6.1

Тип матеріалу	d_c , мм	Q_c , м ³ /год	I , А	U , В	L , мм	$P_{т2}$, МПа	t , с	KBM	y_0 , мм	r_0 , мм	G_n , кг/с

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Якою залежністю можна з деякими припущеннями описати форму фігури напилення?
2. Які фактори впливають на характерні розміри фігури напилення?
3. Які причини викликають несиметричність фігури напилення?
4. Як буде впливати на структуру покриття специфічна форма фігури напилення?

ЛІТЕРАТУРА

1. Порошковая металлургия и напыление покрытия: Учеб. для вузов (В. Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л. К. Дружинин и др.); Под ред. Б. С. Митина: Металлургия, 1987. - 792 с.
2. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. - М.: Химия, 1976. - 296 с.
3. Аппен А. А. Температуроустойчивые неорганические покрытия. 2-е изд. перераб. и доп. Л.: Химия, 1976. - 296.
4. Кудинов В. В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е. и др. Нанесение покрытий плазмой. - М.: Наука, 1990. - 408 с.
5. Максимович Г. Г., Шатинский В. Ф., Копылов В. И. Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями. - Киев: Наук. думка, 1983. - 264 с.
6. Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. - М.: Машиностроение, 1981. - 192 с.
7. Хасуй А. Техника напыления. Пер. с японского - М.: Машиностроение, 1975. - 288 с.
8. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни “Основи інженерії поверхні деталей” / Укл. В.Д. Кузнецов, В. М. Пащенко, М. В. Александровський. - К.: НТУУ КПІ, 1997.- 24 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Основи інженерії поверхні деталей машин і механізмів” для студентів бакалаврського напрямку - 6.0923 - “Зварювання”, спеціальності - 7.092303 – “Технологія і устаткування відновлення та підвищення зносостійкості машин і конструкцій”

Укладачі Андрій Юрійович Осадчук

Олена Павлівна Шиліна

Оригінал-макет підготовлено укладачами

Навчально-методичний відділ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001

Підписано до друку
Формат 29,7x42 $\frac{1}{4}$
Друк різнографічний
Тираж 75 прим.
Зам. №

Гарнітура Times New Roman
Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького державного технічного університету
Навчально-методичний відділ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК №746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ