

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Покриттів, композиційних матеріалів та захисту металів»

В авторській редакції

**СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ
ПОКРИТТІВ**

Навчально-методичні рекомендації
до виконання лабораторного практикуму
для студентів спеціальності 132 – матеріалознавство
ОПП «Матеріалознавство»
(магістерський рівень)

Електронне видання

ДНІПРО
2025

УДК 621.793(076.5)

С 91

Упорядники:

А. М. Ковзік, О. А. Носко, Т. А. Аюпова, І. В. Голуб, О. В. Біла

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми

«Матеріалознавство»

Протокол № 2 від 03.09.2025 р.

С 91 Сучасні технології нанесення та властивості покриттів : навчально-методичні рекомендації до виконання лабораторного практикуму для студентів спеціальності 132 – матеріалознавство ОПП «Матеріалознавство» (магістерський рівень) / упоряд. А. М. Ковзік, О. А. Носко, Т. А. Аюпова, І. В. Голуб, О. В. Біла; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 28 с.

Викладено загальні навчально - методичні рекомендації щодо виконання, оформлення, змісту і послідовності виконання лабораторного практикуму.

Навчально-методичні рекомендації призначені для студентів спеціальності 132 – матеріалознавство ОПП «Матеріалознавство» (магістерський рівень).

© Ковзік А. М. та ін., упорядкування, 2025

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 ВИВЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА РОБОТИ УСТАНОВКИ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТЯ	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 ВИВЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА РОБОТИ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ.....	12
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 ВИЗНАЧЕННЯ ПОРИСТОСТІ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ.....	18
НАСТАНОВИ ЩОДО ЗАХОДІВ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	26
ЛІТЕРАТУРА	27

ВСТУП

На сьогодні нанесення різноманітних покриттів на вироби – розповсюджена технологічна операція, яка дозволяє значно підвищити їх зносостійкість, твердість, корозійну стійкість, технологічність і т. ін. Тому вивчення студентами - матеріалознавцями сучасних технологій нанесення та властивостей покриттів є задачею актуальною.

Мета лабораторного практикуму з дисципліни «Сучасні технології нанесення та властивості покриттів» - формування практичних знань та вмінь з устаткування та технологій, що використовуються при газотермічному та вакуумному напиленні покриттів. Такі знання доцільні для вивчення курсу в цілому.

Для виконання лабораторних робіт студенти повинні заздалегідь ознайомитись зі змістом кожної з них; вивчити наукову та навчальну літературу, пропоновану для теоретичної підготовки з даного питання; використати знання, одержані під час прослуховування відповідного теоретичного курсу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

ВИВЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА РОБОТИ УСТАНОВКИ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТЯ

1.1. Мета проведення лабораторного заняття

Вивчення конструкції та роботи установки газотермічного напилення покриттів з використанням пальника «Іскра-1»

Завдання проведення лабораторного заняття:

В результаті виконання лабораторної роботи студенти мають:

- знати: класифікацію та принципи роботи установок газотермічного нанесення покриттів, конструкцію та роботу газополум'яного пальника «Іскра-1», призначення та роботу вузлів пальника, його технічну характеристику
- вміти: скласти алгоритм нанесення захисного покриття на виріб та реалізовувати його за допомогою пальника «Іскра-1»

1.2 Основні теоретичні положення

Газотермічне напилення – це такий метод отримання покриттів, в якому матеріал, що наноситься, під дією сконцентрованих джерел енергії плавиться, диспергується та переноситься струменем газу до поверхні основи, на якій частинки кристалізуються, утворюючи покриття. Найбільш розповсюдженим видом газотермічного напилення є метод газополум'яного напилення, що пов'язане з простотою реалізації, порівняно дешевою апаратурою, можливістю переміщення установки, задовільною якістю покриттів та ін.

При газополум'яному напиленні джерелом теплової енергії є полум'я, що утворюється в результаті горіння суміші кисню з горючими газами. Розпилення матеріалу покриття здійснюється газополум'яним струменем. Як горючі гази використовують: ацетилен, пропан-бутанову суміш, природний газ та ін. Важливою характеристикою газового полум'я є відношення витрати кисню до витрати пального газу. При стехіометричному співвідношенні між ними газове полум'я називають нейтральним, при надлишку кисню - окислювальним, а при його нестачі - відновлювальним або науглецьованим.

Існуючі конструкції газополум'яних апаратів розраховані на застосування матеріалів, що напильються, у вигляді порошку, дроту, шнурів і стрижнів. До складу обладнання, необхідного для газополум'яного напилення покриттів, зазвичай входить: комплект газополум'яної апаратури, балони зі стиснутими робочими газами, обладнання для абразивно-струминної підготовки поверхні, прилад для розсівання порошку на фракції, термошафа та піч для сушіння порошоків, а також установка для осушення та очищення повітря від олії.

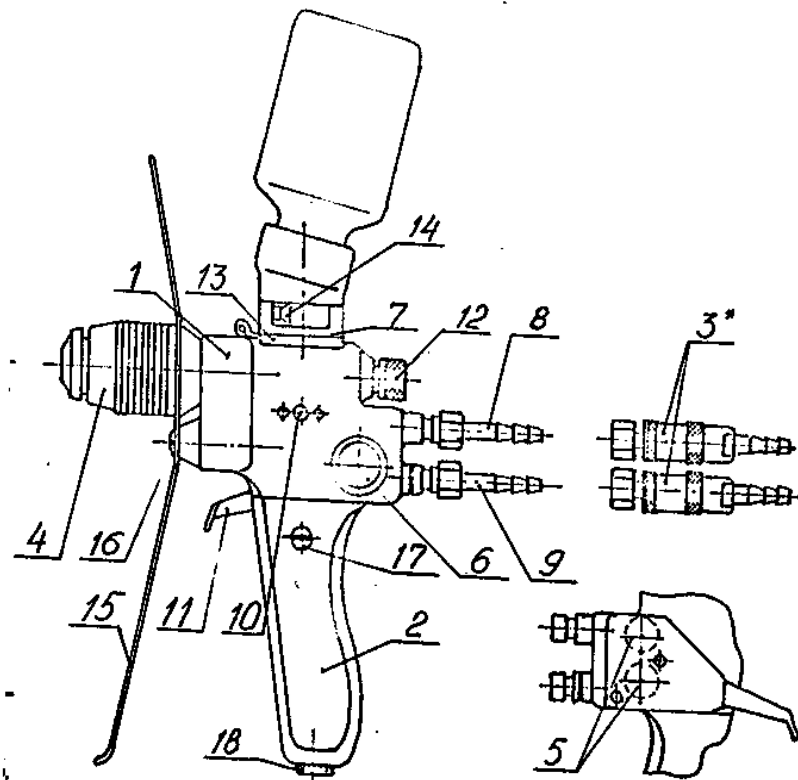
Промисловістю випускається досить багато типів установок для газополум'яного напилення: порошкові-УПТР85, Л5405 «Термо 3» та ін; дротяні – МПІ-4А, МПІ-5 та ін. Добре зарекомендував себе у практиці газополум'яного напилення порошковий пальник «Іскра-1». Він призначений для нанесення зносостійких, корозійностійких та інших видів захисних покриттів. Він може комплектуватися прямою, кутовою та фокусуючою насадками. Технічні характеристики пальника наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики пальника «Іскра-1» [1]

Показник	Величина показника
1. Продуктивність, кг/год	1,5-5
2. Робочий тиск газів, МПа:	
ацетилен	0,07 – 0,1
кисень	0,4 – 0,5
3. Витрата газів, л/хв:	
ацетилен	10-15
кисень	20-23
4. Місткість знімного бункера порошку, л	0,35+ - 0,05
5. Габаритні розміри пальника, мм	170x250x47
6. Маса пальника, кг	1,5

Пальник «Іскра-1» відноситься до класу пальників інжекторного типу. Він складається з наступних основних деталей та вузлів (рисунок 1.1):

- а) корпус пальника;
- б) рукоятка пальника з пеналом для голок;
- в) захисний екран;
- г) газорозподільний пристрій, що включає:
 - швидкодіючі мембранні клапани;
 - кран голковий ацетиленовий;
 - ствольова насадка;
 - штуцери для кріплення гнучких шлангів;
- д) пристрій керування подачею порошкового матеріалу, що включає:
 - кран голковий;
 - швидкодіючий порошковий клапан.



1-корпус; 2-рукоятка; 3-клапан; 4-стволова насадка; 5-мембранні клапани; 6-кран ацетиленовий; 7-порошковий клапан; 8,9-штуцери для кріплення шлангів; 10-отвори; 11-важиль; 12-кран ігольчатий; 13-планка; 14-клапан; 15-екран; 16-винт; 17-винт; 18-пенал з набором голок

Рисунок 1.1 - Пальник «Іскра-1» [1]

Корпус пальника є базовою деталлю. До нього приєднуються інші вузли. У ньому розміщені інжектори по ацетилену і транспортувального газу зі змішувальними камерами, системи газових каналів і клапанів. Посадочні отвори на корпусі призначені для кріплення пальника за допомогою державок на різному устаткуванні, що використовується як маніпулятор при нанесенні покриттів.

Газорозподільний пристрій служить для керування подачею газів (кисню та ацетилену), включення та вимикання пальника. У корпус впаяний штуцер для кріплення гнучких шлангів.

Для оперативного перекриття газових магістралей наявний мембранний клапан. Керуючий ним важіль має два крайні положення: "відкрито" - від себе, "закрито" - на себе. У положенні «відкрито» під тиском пружини мембрана відходить від сідла клапана, що забезпечує проходження робочих газів через клапан та систему газових каналів пальника. Голковий ацетиленовий кран розташований на лівій бічній поверхні корпусу і служить для керування витратою ацетилену.

Пристрій управління подачею порошкового матеріалу служить для включення, вимкнення та регулювання витрати порошку. Воно включає порошковий клапан з бункером і голковий кран.

Голковий кран транспортуючого газу встановлений на задній поверхні корпусу і служить для управління витратою газу, що транспортує матеріал, який напильється.

Для запобігання перегріву бункера та захисту рук оператора від теплового випромінювання на корпусі пальника закріплений екран.

1.3 Прилади, приладдя та матеріали

1.3.1 Пальник газополум'яного напильнення «Іскра – 1».

1.3.2 Балони з ацетиленом та киснем.

1.3.3 Порошки (за вказівкою викладача).

1.3.4 Сталеві пластини.

1.3.5 Розчинник (бензол, ацетон та ін.).

1.3.6 Наждачний папір.

1.3.7 Ваги технічні з різновагами.

1.3.8 Сушильна шафа.

1.3.9 Шафа для напилення.

1.4 Порядок виконання роботи

Пункти 1.4.6, 1.4.7 виконує учбовий майстер або викладач в присутності студентів!

1.4.1. Ознайомитись із призначенням, принципом роботи газополум'яного пальника «Іскра-1» (за інструкцією до пальника).

1.4.2. Ознайомитись із призначенням та принципами роботи вузлів пальника.

1.4.3. Ознайомитись з технічними характеристиками пальника.

1.4.4. За допомогою наждачного паперу та розчинника підготувати поверхню сталевих зразків до напилення.

1.4.5. Зважити підготовлені зразки на технічних терезах з точністю до 0,01г.

1.4.6. Підготувати пальник до нанесення покриття, для чого:

1.4.6.1. Під'єднати пальник гнучким шлангом до кисневого балона;

1.4.6.2. Відкрити вентиль кисневого балону. За допомогою редуктора встановити тиск газу 0,4 МПа при відкритому мембранному клапані пальника (положення курка - "від себе");

1.4.6.3. Відкрити на пальник кран подачі ацетилену. Здійснити перевірку працездатності інжектора, закривши пальцем отвір для підведення ацетилену. При цьому повинно забезпечуватися підсмоктування;

1.4.6.4. Відкрити голковий кран подачі транспортувального газу, перевірити працездатність інжектора порошкового матеріалу, закривши пальцем отвір підведення порошкового матеріалу. При цьому повинно забезпечуватися підсмоктування;

1.4.6.5. Під'єднати пальник гнучким шлангом до ацетиленового балона;

1.4.6.6. При відкритому мембранному клапані встановити тиск ацетилену за манометром 0,07 – 0,08 МПа;

1.4.6.7. Підсушений порошковий матеріал засипати в бункер-живильник; зважити його з точністю до 0,01 г;

1.4.6.8. Встановити бункер із клапаном на пальник.

1.4.7. Нанести на сталевий зразок покриття, для чого:

1.4.7.1. Відкрити мембранний клапан пальника та запалити на виході сопла ацетилен. Потім повільно подати кисень.

1.4.7.2. відрегулювати голчастим краном по ацетилену газовий факел. При нормальному горінні та нейтральному полум'ї спостерігається відрив факела від сопла на відстань 1-1,5 мм;

1.4.7.3. Відрегулювати голчастим краном по транспортувальному газу, витрату порошкового матеріалу.

1.4.7.4. Виконати напилення. Дистанцію напилення та час вказує викладач;

1.4.7.5. Для припинення напилення закрити порошковий клапан. Плавним рухом на себе курка мембранного клапана погасити факел.

1.4.8. Від'єднати від пальника та зважити з точністю до 0,01 г бункер із порошком. Визначити витрати порошку на напилення.

1.4.9. Зважити з точністю до 0,01 г зразок із покриттям. Розрахувати масу покриття.

1.4.10. Розрахувати коефіцієнт використання матеріалу, як відношення маси покриття до витрат порошку на напилення.

1.4.11. Від'єднати пальник від балонів.

1.5 Порядок оформлення звіту

У звіті навести схему пальника «Іскра-1», її призначення та принцип роботи, призначення та принцип роботи вузлів пальника, технічні характеристики пальника, розрахунок коефіцієнта використання матеріалу.

1.6 Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальним посібником вивчити технологічні особливості газотермічного напилення покриттів.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Назвіть сутність процесів газотермічного напилення покриттів.
2. Що є джерелом теплової енергії при газополум'яному напиленні покриттів?
3. Назвіть переваги нанесення покриттів газополум'яним методом.
4. Назвіть основні вузли установки газополум'яного напилення покриттів.
5. Назвіть основні деталі пальника «Іскра-1».
6. Як визначається коефіцієнт використання матеріалу (порошку)?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ВИВЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ТА РОБОТИ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ

2.1 Мета проведення лабораторного заняття:

Вивчення конструкції та роботи установки вакуумного напилення покриттів з використанням вакуумного універсального посту ВУП5М-01

Завдання проведення лабораторного заняття:

В результаті проведення лабораторної роботи студенти мають:

- знати: вплив технологічних параметрів на ефективність напилення та закономірності формування покриттів при вакуумному напиленні, призначення та роботу основних вузлів електроннопроменевої установки для напилення покриттів у вакуумі, переваги даного методу;
- вміти: аналізувати вплив технологічних параметрів електроннопроменевого випаровування при формуванні покриттів на продуктивність процесу напилення та якість покриття.

2.2 Основні теоретичні положення

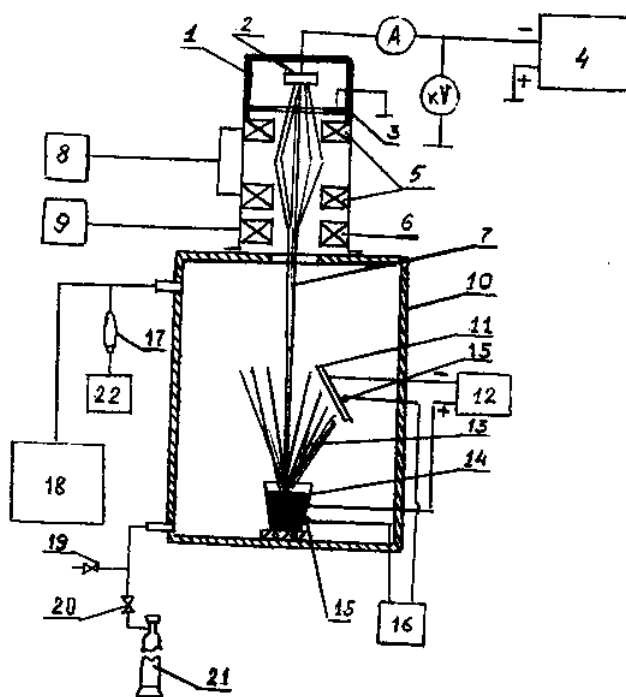
Успіхи у розвитку вакуумної техніки та електронної оптики призвели до широкого використання електронно-променевої технології у різних галузях техніки, у тому числі при напиленні матеріалів. Покриття, отримані з використанням цієї технології, відрізняються більш досконалою структурою покриттів, кращою корозійною стійкістю та більш високою міцністю зчеплення з поверхнею основи в порівнянні з аналогічними покриттями традиційними електрохімічними способами [2].

Основні причини залучення електронного пучка у процесі пов'язані з випаровуванням матеріалів. Якщо при багатьох інших способах нагріву енергія підводиться до поверхні, що випаровується, через стінку тигля і через матеріал, що випаровується, то при електронно-променевому випаровуванні ця поверхня безпосередньо нагрівається електронами, що бомбардують її.

Фокусування електронного пучка дозволяє отримувати щільність енергії до $5 \cdot 10^8$ Вт/см², що у свою чергу забезпечує можливість випаровування з великою швидкістю навіть тугоплавких матеріалів. ККД цього способу нагрівання (до 80%) значно перевищує ККД інших способів (плазмовий – до 20%, лазерний – до 5-10%).

Пучок електронів створюється за допомогою електронної гармати. Електрони, імітовані катодом, прискорюються в електричному полі між катодом і анодом. Залежно від типу електронної гармати прискорююча напруга становить 5-60 кВ. Електромагнітні системи, що відхиляють і фокусують сформований промінь, направляють його на поверхню матеріалу, який інтенсивно випаровується.

Схема експериментальної установки плазмового напилення представлена на рисунку 2.1 [3-4].



1 - корпус електронної гармати; 2 - катод; 3 - анод; 4 - високовольтне джерело живлення; 5 - фокусуюча система; 6 - відхильна система; 7 - електронний пучок; 8 - блок живлення фокусуючої системи; 9 - блок живлення системи, що відхиляє; 10 - вакуумна камера; 11 - напилюваний виріб; 12 - блок живлення для створення розряду, що тліє; 13 - потік пари напилюваного матеріалу; 14 - тигель з матеріалом, що випаровується; 15 - термопара; 16 - мілівольтметр; 17 - манометрична лампа; 18 - система відкачування; 19 - кран для напуску повітря; 20 - натікач; 21 - балон; 22 - вакууметр.

Рисунок 2.1 – Схема установки плазмового напилення

Основним її вузлом є електронна гармата (1) з холодним катодом (2). Прискорююча напруга подається від високовольтного джерела живлення (3). Позитивний його вивід заземлений. Струм, споживаний електронною гарматою, вимірюється амперметром, напруга, що прискорює - кіловольтметром. Конструкція електронної гармати дозволяє використовувати прискорюючу напругу до 15 кВ. Фокусування електронного пучка здійснюється системою фокусування (5). Для отримання щільних пучків потік електронів спочатку розпушується, а потім концентрується магнітними лінзами. Живлення фокуруючої системи здійснюється від джерела живлення (8). Відхилююча система (6) служить для відхилення електронного пучка від вертикальної вісі у двох площинах і являє собою магнітну лінзу.

Випарюваний матеріал у тиглі (14) розміщений у вакуумній камері (10) на одній вісі з електронною гарматою. Виріб (11), що напилюють, кріпиться на штативі, ізольованому від корпусу камери. Його очищення перед нанесенням покриття та підігрів здійснюють тліючим розрядом. Для його створення використовується високовольтне джерело живлення (12). Температура виробу та тигля вимірюється термопарами (15). Як вторинний прилад використовується пірометричний мілівольтметр (16).

Перед нанесенням покриттів речовина, що випаровується, поміщається в тигель. Тигель встановлюється у вакуумній камері безпосередньо під електронною гарматою. Поверхня виробу, що напилюється, очищається від забруднень, знежирюється органічним розчинником. Виріб встановлюється у вакуумній камері та підключається до негативного полюса джерела живлення (12). Вакуумна камера герметизується та проводиться відкачування повітря за допомогою вакуумної системи (18). Тиск повітря у системі вимірюється за допомогою манометричної лампи (17).

Для створення умов утворення розряду, що тліє, в систему напускається інертний газ (Ar) до заданого тиску і включається відповідне джерело живлення (12). Після очищення в розряді, що тліє, поверхні основи і прогріву її до необхідної температури включається високовольтне джерело живлення електронної гармати. За допомогою фокууючої і відхиляючої систем пучок електронів концентрується і направляється на поверхню матеріалу, що випаровується. У процесі напилення покриття між матеріалом, що

напилюється, і виробом, що є катодом, горить тліючий розряд. Електрони, стикаючись з частинками пари, призводять до їхньої часткової іонізації. Іони під впливом електричного поля прискорюються у бік основи.

При реактивному напилюванні у вакуумну камеру замість інертного газу вводять активний газ (O_2 , N_2 , CH_4 тощо), який на поверхні основи реагує з випареним матеріалом з утворенням оксидів, нітридів або карбідів. Конструкція електронної гармати дозволяє вести процес у низькому вакуумі (до $7 \cdot 10^2$ Па).

Після завершення процесу вимикається живлення електронно-променевої гармати та тліючого розряду.

Виріб охолоджується у вакуумі або в інертному газі. Для розгерметизації установки відкривається кран (19), повітря надходить у камеру і тиск у ній зрівнюється з атмосферним.

2.3 Прилади, приладдя та матеріали

2.3.1 Установка для напилення покриттів ВУП-5М-01 (в режимі електронного випарювача).

2.3.2 Шліфувальний папір.

2.3.3 Шліфувальний верстат.

2.3.4 Органічний розчинник.

2.3.5 Напилюваний виріб і матеріал, що випаровується (вказує викладач).

2.3.6 Гази (аргон, кисень, метан, азот).

2.4 Порядок проведення роботи

Пункт 2.4.3 виконує учбовий майстер або викладач в присутності студентів!

2.4.1 Ознайомиться із сутністю електронно-променевого випаровування матеріалів та впливом технологічних параметрів на його ефективність.

2.4.2 Ознайомитись із конструкцією установки для напилення покриттів ВУП5М-01.

2.4.3 Дослідити вплив потужності, що підводиться до електронної гармати, тиску в камері, матеріалу, що випаровується, на продуктивність напилення та адгезію покриття до основи (оцінюється візуально та методом ґратчастих надрізів), для чого:

2.4.3.1 Провести підготовку поверхні зразка, що напилюється (шліфування, знежирення) і встановити його у вакуумній камері.

2.4.3.2 Завантажити тигель напилюваною речовиною та встановити у вакуумній камері.

2.4.3.3 Провести вакуумування системи.

2.4.3.4 Провести напилення покриття.

2.4.3.5 Охолодити зразок, розгерметизувати систему та провести оцінку якості покриття.

2.5. Порядок оформлення звіту

У звіті провести опис сутності випаровування матеріалів електронним пучком, вплив технологічних параметрів на ефективність напилення, конструктивних особливостей експериментальної установки, результатів проведених досліджень.

2.6. Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальними посібниками вивчити вплив конструктивних та технологічних параметрів на ефективність напилення. Закономірність формування покриттів при вакуумному напиленні.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Переваги та недоліки вакуумного конденсаційного напилення покриттів.
2. Переваги електронно-променевого випаровування речовин.
3. Отримання електронних пучків.
4. Недоліки випаровування матеріалів електронним променем.

5. Призначення та конструкція окремих вузлів експериментальної установки.
6. Закономірності формування покриттів при вакуумному напиленні.
7. Вплив технологічних властивостей на ефективність вакуумного напилення.
8. Характеристика тліючого розряду.
9. Сутність реактивного напилення покриттів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПОРИСТОСТІ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

3.1 Мета проведення лабораторного заняття

Отримати навички визначення щільності та пористості покриттів, ознайомитись з методами визначення істинної щільності; відкритої, закритої та загальної пористості покриттів.

Завдання проведення лабораторного заняття:

В результаті проведення лабораторної роботи студенти мають:

- знати: сутність методів визначення істинної щільності, пористості покриття, вплив параметрів процесу напилення на пористість покриттів;
- вміти: самостійно провести визначення істинної щільності покриттів; відкритої, закритої та загальної пористості покриття.

3.2 Основні теоретичні положення

Нанесені напиленням покриття можуть мати підвищені зносостійкі, корозійностійкі, жаростійкі, хімічно стійкі та інші властивості. При газотермічному напиленні покриття утворюється з окремих розплавлених або близьких до стану розплавлення частинок. Розплавлені частинки з високою швидкістю стикаються з поверхнею основи та нашаровуються на ній, що призводить до утворення захисного шару на поверхні виробу. Контактні процеси при ударі, деформації, затвердінні та охолодженні частинок, а також процеси їх фізико-хімічної взаємодії з навколишнім середовищем під час руху до поверхні виробу визначають структуру та властивості покриття. Для напилення використовуються різні матеріали: метали, сплави, кераміку, пластмаси. Тому діапазон характеристик таких покриттів дуже широкий [5].

Важливим моментом процесу затвердіння напилених частинок на поверхні основи є виділення газів, розчинених у рідкому металі, що супроводжується утворенням закритих і відкритих пір в об'ємі покриття.

Наявність пір у покритті може дати позитивний ефект і підвищити зносостійкість, коли, наприклад, покриття наносять на ділянки, що труться, так як в порах може зберігатися мастило. Однак у випадках, коли покриття використовується як антикорозійне або в інших аналогічних випадках агресивні гази або рідини можуть проникнути по порах до поверхні основи і знизити працездатність деталі.

Щільність і пористість – основні характеристики покриття, за якими можна побічно судити про якість напиленого матеріалу покриття. За пористістю та відносною щільністю покриттів оцінюють ефективність того чи іншого методу нанесення покриття або методу його обробки [3-5].

На величину пористості напилених покриттів істотно впливає як сам метод напилення, так і умови напилення: режим роботи розпилювача, відстань напилення, теплофізичні характеристики матеріалу основи та її температура при напиленні, властивості напилюваного матеріалу, швидкість подачі напиленого матеріалу, швидкість переміщення основи або пальника і т.д.

У разі збільшення відстані напилення спостерігається підвищення пористості. В цьому випадку відбувається не тільки зниження температури частинок в момент зіткнення з основою, але і знижується їх швидкість, що і зумовлює такий характер зміни пористості напилених матеріалів. На невеликих відстанях напилення, що відповідають утворенню щільного покриття з малою пористістю, може статися перегрів та деформація основи. Крім цього, при напиленні на малих відстанях можуть виникнути труднощі, пов'язані з отриманням поверхні покриття. Зі збільшенням відстані напилення кількість пір у покритті, що сполучені з його поверхнею (відкрита пористість), стає більшою. Найбільш щільними та такими, що мають найменшу відкриту пористість є покриття, отримані газополум'яним дротяним напиленням. Більшість пір у такому покритті ізольовано від довкілля, тобто. пористість тут переважно закрита.

При нанесенні порошкових матеріалів зниження витрати порошку, що напилюється, і зменшення швидкості переміщення пальника призводить до деякого збільшення щільності покриття. Покриття, отримані при вищій температурі основи, мають підвищене зчеплення частинок між собою і нижчу пористість [4].

Методи визначення щільності та пористості матеріалів

Щільність пористих матеріалів простої форми визначається шляхом геометричного вимірювання об'єму (v) та зважування зразка (m):

$$d = \frac{m}{v}. \quad (3.1)$$

Об'єм виробів складної форми визначається методом гідростатичного зважування в рідині (найчастіше в дистильованій воді). Для цієї мети зразок зважують на повітрі (m_1), потім для попередження попадання в пори води поверхню зразка покривають тонкою захисною плівкою (парафін, вазелін і т.п.) і знову зважують на повітрі (m_2) та зануреним у рідину (m_3). В цьому випадку щільність матеріалу визначається рівнянням:

$$d = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \cdot d_p, \quad (3.2)$$

де d_p – щільність витісненої рідини, г/см³.

При порівняльному аналізі властивостей пористих матеріалів особливого значення набуває не абсолютна (d), а відносна (Q) щільність, яка є відношенням абсолютної щільності пористого тіла до істинної щільності тіла в компактному стані (d_k), виражене у відсотках:

$$Q = \frac{d}{d_k} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

Значення d_k для однорідного металу є довідковою величиною, для складних систем відомого складу ця величина розраховується за правилом аддитивності. Найбільш точну оцінку d_k дає визначення пікнометричної щільності.

Пористість, що має важливе значення поряд із щільністю, виражається у частках або у відсотках:

$$\Pi_{\text{заг}} = 1 - \frac{d}{d_k} \quad \text{або} \quad \Pi_{\text{заг}} = \left(1 - \frac{d}{d_k}\right) \cdot 100\% \quad (3.4)$$

Пористість також може бути виражена через різницю об'ємів:

$$P_{\text{заг}} = \frac{v}{v_k} - 1 \quad \text{або} \quad P_{\text{заг}} = \left(\frac{v}{v_k} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (3.5)$$

де $P_{\text{заг}}$ - загальна пористість тіла;

v - об'єм пористого тіла;

v_k - об'єм того ж матеріалу рівної маси у компактному стані.

Загальна пористість матеріалу може бути підрозділена на відкриту ($P_{\text{відкр}}$), під якою розуміють об'єму пір, сполучених з поверхнею виробів, та закриту ($P_{\text{закр}}$). Величина відкритої пористості /% / визначається за формулою:

$$P_{\text{відкр.}} = \left[\frac{(w_2 - w_1) \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{(w_2 - w_3) \cdot \rho_p} \right] \cdot 100\%, \quad (3.6)$$

де w_1 – маса непросоченого зразку на повітрі, г;

w_2 – маса просоченого рідиною зразку на повітрі, г;

w_3 - маса просоченого зразку в воді, г;

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$, ρ_p – щільності води та просочуючої рідини, г/см³

При визначенні відкритої пористості із зразка у вакуумі видаляють газ, а потім просочують рідиною (очищеною олією, ксилолом, бензоловим спиртом тощо). Зважують зразок згідно пояснень у формулі (3.6).

Закриту пористість $P_{\text{закр.}}$ визначають як різницю між загальною та відкритою пористістю:

$$P_{\text{закр.}} = P_{\text{заг.}} - P_{\text{відкр.}} \quad (3.7)$$

При визначенні відкритої пористості шляхом просочення молекули рідини можуть проникати не всі порожнини, так що частина особливо вузьких щілин залишиться незаповненою і при розрахунку увійде в кількість закритих пір.

Розмір пір та розподіл їх за розмірами можуть бути визначені або металографічно, або одним з металів, заснованих на витісненні рідини

(наприклад, води) з пористого зразка, або, навпаки, на вдавлюванні рідини (наприклад, ртуті) в пори.

3.3 Прилади, приладдя та матеріали

3.3.1 Аналітичні ваги.

3.3.2 Пікнометр.

3.3.3 Вакуумний ексикатор.

3.3.4 Зразки покриття.

3.3.5 Парафін.

3.3.6 Бензол.

3.3.7 Бензиловий спирт.

3.3.8 Дистильована вода.

3.3.9 Шовкова нитка.

3.4 Порядок проведення роботи

3.4.1. Зробити опис зразків напиленого покриття. Надається опис зовнішнього виду зразків, їх форми та розмірів.

3.4.2. Визначити пікнометричну щільність вихідного матеріалу для напилення.

Експериментальне визначення пікнометричної щільності ($d_{\text{к вих.}}$) вихідного порошку сталі 15X12М6ФД проводиться відповідно до методичних вказівок щодо виконання лабораторної роботи «Визначення фізичних властивостей металевих порошків». Отримані дані заносяться до таблиці 3.1.

Розрахунок пікнометричної щільності вихідного порошку проводиться за формулою:

$$d_{\text{к вих.}} = \frac{q_2 - q_1}{v_{\text{пikн.}} - \frac{q_3 - q_2}{\rho_{\text{p пикн.}}}} \quad (3.8)$$

де q_1 – маса пікнометру, г;

q_2 – маса пікнометру з порошком, г;

q_3 – маса пікнометру з порошком і рідиною, г;

$v_{\text{пикн.}}$ - об'єм пікнометра, см³;

$\rho_{\text{р пікн.}}$ – щільність пікнометричної рідини.

Щільність компактного матеріалу ($d_{\text{к розр.}}$) розраховується також за законом адитивності:

$$d_{\text{к розр.}} = \frac{n_1}{\sum n_i} d_1 + \frac{n_2}{\sum n_i} d_2 + \dots + \frac{n_n}{\sum n_i} d_n, \quad (3.9)$$

де $n_1, n_2, \dots, n_n$ – кількість молей окремих компонентів у 100 г суміші;
 $d_1, d_2, \dots, d_n$ – щільності окремих компонентів суміші.

Значення щільності порошку сталі, отримані пікнометричним методом та методом розрахунку порівняти між собою.

3.4.3. Визначити загальну пористість покриття гідростатичним зважуванням

3.4.3.1 На зразок напиленого покриття прив'язати шовкову нитку для його підвішування на коромисло ваг.

3.4.3.2 Зразок разом із тонкою ниткою зважити на аналітичних вагах (m_1).

3.4.3.3 Занурити на короткий час зразок у розплав парафіну. Зважити на повітрі вкритий шаром парафіну зразок (m_2).

3.4.3.4 На спеціальній підставці встановити посудину з дистильованою водою під лівою філіжанкою аналітичних ваг. На ліве коромисло ваг підвісити на нитці покритий парафіном зразок, опустити його в дистильовану воду до повного занурення і зважити зразок в рідині (m_3).

Провести вимірювання маси за описаною вище методикою для декількох зразків покриттів та дані занести до таблиці 3.2.

Розрахувати загальну пористість покриття за формулою 3.4.

3.4.4. Визначити відкриту пористість покриття.

3.4.4.1. Зразок покриття зважити на аналітичних вагах (w_1).

3.4.4.2. Опустити зразок в посудину з рідиною для просочення (бензиловий спирт).

3.4.4.3. Посудину із зразком і рідиною помістити у вакуумний ексикатор і провести вакуумування протягом 1 години до повного насичення зразка рідиною.

3.4.4.4. Витягти просочений зразок і визначити його масу (w_2).

3.4.4.5. Зважити просочений зразок у дистильованій воді аналогічно з пунктом 3.3.4 і визначити масу w_3 .

Розрахувати відкриту пористість за формулою 3.6.

Дослідження провести з декількома зразками та дані занести до табл. 3.3.

3.4.5. Визначення закритої пористості

Розрахувати закриту пористість покриття за формулою 3.7. Внести результат у таблицю 3.3.

3.5 Обробка експериментальних даних

Результати вимірювань заносяться до табл. 3.1, 3.2, 3.3.

Таблиця 3.1- Визначення пікнометричної щільності

№ досліджу	Маса сухого пікнометра, q_1 , Г	Маса пікнометра з порошком, q_2 , Г	Маса пікнометра з порошком і рідиною, q_3 , Г	$d_{\text{к вих.}}, \text{Г/см}^3$	$d_{\text{к розрах.}} \text{Г/см}^3$
1					
2					

Таблиця 3.2 - Визначення загальної пористості

№ досліджу	Маса зразка, m_1 , Г	Маса зразка з парафіном на повітрі, m_2 , Г	Маса зразка з парафіном у рідині, m_3 , Г	Загальна пористість, $P_{\text{заг.}}, \%$
1				
2				
Середнє				

Таблиця 3.3 - Визначення відкритої та закритої пористості покриття

№ досліджу	Маса сухого зразка, w_1 , Г	Маса просоченого зразка, w_2 , Г	Маса просоченого зразка у воді, w_3 , Г	Відкрита пористість, $P_{\text{відкр.}}, \%$	Закрита пористість, $P_{\text{закр.}}, \%$
1					
2					

3.6 Порядок оформлення звіту

У звіті навести загальні відомості про щільність і пористість напилених покриттів, про вплив умов напилення на властивості одержуваних покриттів, про методику та порядок обробки даних щодо визначення різних видів пористості напилених покриттів.

Сформулювати висновки щодо результатів роботи.

3.7 Завдання на самостійну роботу

За матеріалами лекцій та навчальними посібниками вивчити методики визначення щільності та пористості напилених покриттів, впливу умов напилення на властивості покриттів. Підготуватись до виконання лабораторної роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Особливості процесу напилення та основні фізико-хімічні властивості напилених покриттів.
2. Вплив параметрів процесу напилення на пористість покриттів.
3. Зв'язок між загальною, закритою та відкритою пористістю.
4. Що таке відносна щільність і як вона визначається?
5. Методи визначення загальної пористості матеріалів.
6. Сутність пікнометричного методу визначення справжньої щільності пористих матеріалів.
7. Сутність визначення об'єму пористого матеріалу методом гідростатичного зважування.

НАСТАНОВИ ЩОДО ЗАХОДІВ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

При виконанні лабораторних робіт необхідно дотримуватись загальнообов'язкових правил техніки безпеки, що стосуються експлуатації газозварювального обладнання та електричних приладів.

Основними джерелами небезпеки є:

- пожеже- та вибухонебезпечність робочих газів;
- ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання полум'я, що виходить з пальника;
- розбризкування розплавлених частинок матеріалу, що напильється;
- ураження електричним струмом.

До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки. Категорично забороняється робота з нею без викладача чи учбового майстра.

Балони з газами повинні бути встановлені в приміщенні на відстані не менше 5 метрів від робочого місця та надійно закріплені. Кріплення шлангів повинно бути міцним, що виключає їх зрив та пропуск газів.

Якщо стався спалах газу під час роботи пальника – негайно відключити його. Після цього дозволяється включати пальник не менше ніж через 30 с. Якщо знову відбувається спалах - припинити напильнення та усунути причину.

Напильнення дозволяється проводити у спеціальній шафі при включеній витяжній вентиляції. Для захисту очей від світлового випромінювання покриття, що наносять, оператор повинен працювати в захисних окулярах зі світлофільтром.

Категорично забороняється торкатися оголених токопровідних частин устаткування. Забороняється використання електроустаткування, яке є несправним.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дубовий О.М., Степанчук А.М. Технологія напилення покриттів. – Миколаїв: НУК. 2007. – 236с.
2. Корас В.М. Технологія та обладнання для напилення: Навч. посібник. – К.: НМЦ ВО. – 2009. – 152с.
3. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів: Навч. посібник, ч.1 – Дніпропетровськ: НМетАУ. 2008. – 51с.
4. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів: Навч. посібник, ч.ІІ – Дніпропетровськ: НМетАУ. 2008. – 38с.
5. Білик, І. І., & Руденький, С. О. (2023). Технологія нанесення покриттів та їх властивості: навчальний посібник [Електронний ресурс]. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 120 с.

Навчально-методичне видання

Ковзік Анатолій Миколайович,
Носко Ольга Анатоліївна,
Аюпова Тетяна Анатоліївна,
Голуб Ірина Валеріївна,
Біла Олена Вікторівна

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ

Навчально-методичні рекомендації
до виконання лабораторного практикуму
для студентів спеціальності 132 – матеріалознавство ОПП
«Матеріалознавство» (магістерський рівень)

Електронне видання

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 63 від 19.09.2025)

В авторській редакції
Комп'ютерна верстка Т. А. Аюпова

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 1,62. Обл.-вид. арк. 1,64.
Зам. № 97.

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010