

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт
з дисципліни "Технологія нанесення та властивості покриттів"
для студентів спеціальності 132 – "Матеріалознавство" за
спеціалізацією (освітньою програмою) "Композиційні та
порошкові матеріали, покриття" денної форми навчання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Технологія нанесення та властивості покриттів" для студентів спеціальності 132 – "Матеріалознавство" за спеціалізацією (освітньою програмою) "Композиційні та порошкові матеріали, покриття" денної форми навчання / Укл.: О.А. Мітяєв, О.С. Петрашов. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 65 с.

Укладачі: О.А. Мітяєв, професор, д.т.н.
О.С. Петрашов, ст. викладач

Рецензент: І.П. Волчок, професор, д.т.н.

Відповідальний
за випуск: Т.В. Кавурко, ст. лаб.
І.М. Сохрякова, пров. фах.

Затверджено
на засіданні
НМК ФБАД
Протокол № 2
від " 02 " вересня 2021 р.

Затверджено
на засіданні кафедри
"Композиційні матеріали, хімія
та технології"
Протокол № 10
від " 06 " липня 2021 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота № 1. Дослідження впливу способу підготовки поверхні на її шорсткість та міцність зчеплення напиленого покриття.....	5
Лабораторна робота № 2. Вплив параметрів режиму дугового наплавлення на характеристики покриття.....	13
Лабораторна робота № 3. Вибір режимів напилення покриттів електродуговим методом.....	23
Лабораторна робота № 4. Газополуменеве нанесення покриттів і дослідження впливу технологічних параметрів напилення на їх властивості.....	38
Лабораторна робота № 5. Вплив технології нанесення гальванічних покриттів на їх характеристики та властивості.....	55
Перелік рекомендованої літератури.....	65

ВСТУП

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Технологія нанесення та властивості покриттів" для студентів спеціальності 132 – «Матеріалознавство» за освітньою програмою «Композиційні та порошкові матеріали, покриття» спрямовані на підготовку фахівців, що здатні ефективно виконувати професійну діяльність, та набуття ними компетентностей, що дозволять вирішувати складні спеціалізовані та практичні задачі.

Матеріали, що наведено у методичних вказівках, не є науковою працею, а являють собою відомі факти з відкритих джерел, що викладено укладачами у певній послідовності з метою формування у пошукачів вищої освіти навичок до розв'язання складних спеціалізованих і практичних завдань, що пов'язані зі створенням та нанесенням різних за призначенням покриттів.

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СПОСОБУ ПІДГОТОВКИ ПОВЕРХНІ НА ЇЇ ШОРСТКІСТЬ ТА МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ НАПИЛЕНОГО ПОКРИТТЯ

Мета роботи

Вивчити будову та принцип роботи установки для струменево-абразивної підготовки поверхні. Дослідити вплив способу підготовки на шорсткість поверхні та міцність зчеплення.

Загальні відомості

Загальні відомості до даної лабораторної роботи містять матеріали, що викладено в джерелах [1-6].

Попередня обробка поверхні основи є важливим чинником для забезпечення міцного зчеплення напиленого покриття з нею, тому що в більшості випадків з'єднання напиленого покриття з основою відбувається в результаті механічного зчеплення. Отже, для того, щоб напилювані частинки, що співударяються та деформуються, міцно зчеплювалися з нерівностями поверхні, основа повинна бути досить шорсткою. Збільшення міцності механічного зчеплення пов'язано зі збільшенням площі поверхні основи і підвищенням її активності. Тому створення розвиненої шорсткості на поверхні основи є важливою вимогою.

Установка для струменево-абразивної обробки поверхні (рис. 1.1) являє собою металеву шафу, що обладнана витяжною вентиляцією 3 та освітленням внутрішнього простору 1. У верхній частині шафи розташоване оглядове вікно 2. Під вікном розташовані дверцята 13, через які здійснюється доступ у середину шафи. В нижній частині шафи знаходиться абразив 10 із забірником 9, через який він надходить до пістолета під час проведення робіт. У середній частині знаходиться робочий столик 12 і пістолет 4 з рукавами, що підводять до нього абразив 7 та стиснуте повітря 6, яке подається за допомогою вентилів стиснутого повітря: головного 8 та робочого 5. Робочий простір і

нижню частину, в якій знаходиться абразив, розділяє сітка 11, що запобігає випадковому падінню оброблюваних деталей до абразиву.

Струменево-абразивна обробка здійснюється пістолетом при зачинених дверцятах шафи. Доступ до пістолета здійснюється через отвір у дверцятах з рукавицями, що захищають руки працівника від дії абразивних частинок та пилу.

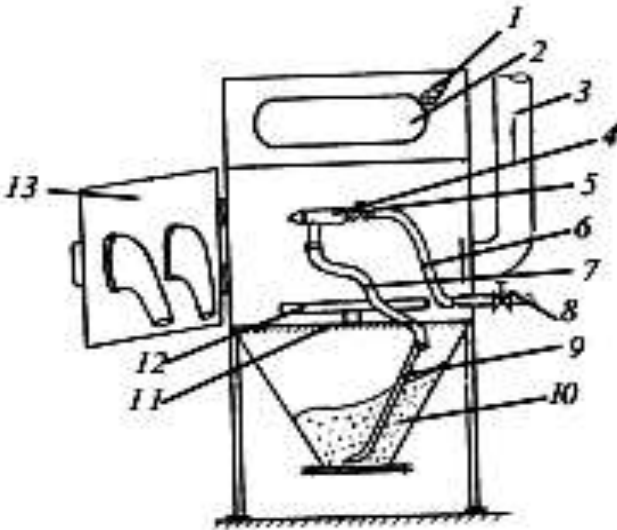


Рисунок 1.1 - Схема установки струменево-абразивной обработки [6].

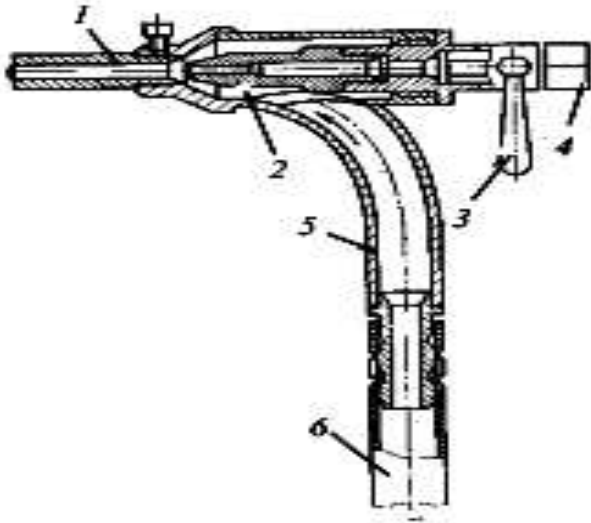
У пістолет (рис. 1.2) подається стиснуте повітря, витікаючи через сопло в напрямку вихідного отвору ковпака, - створюється спрямований потік. За принципом інжекції в просторі навколо потоку виникає розрядження, яке засмоктує по каналу подачі абразив із бункера; потрапляючи в потік, його частки розганяються і далі летять у бік оброблюваної деталі, вдаряючись об неї, вони очищують та активують поверхню.

При роботі необхідно виконувати наступні основні вимоги.

1. Перед проведенням струменево-абразивної підготовки поверхні з деталей варто видаляти жир, мастило та бруд.

2. При проведенні підготовки поверхні основи необхідно враховувати матеріал деталі (твердість, в'язкість), умови експлуатації її із покриттями.

3. Як абразив рекомендується використовувати шліф-зерно електрокорунда, а також металевий дріб.



1 - наконечник; 2 - ежекторний вузол; 3 - вентиль, що перекриває подачу стиснутого повітря; 4 - з'єднувальний фланець; 5 - канал подачі абразиву; 6 - рукав подачі абразиву

Рисунок 1.2 – Пістолет струменево-абразивний [6].

4. Металевий абразив повинен бути знежирений, без слідів іржі та зберігатися в умовах, що запобігають його корозії, забрудненню мастилом, жиром, пилом.

5. Не рекомендується застосовувати металевий абразив при підготовці деталей з міді, мідних сплавів та інших матеріалів з високою в'язкістю при нанесенні жаростійких і корозійностійких покриттів.

6. У випадку нанесення корозійностійких покриттів із металевих сплавів допускається використовувати для активації основи металевий

абразив, виготовлений з матеріалу з масовою часткою силіцію 13...17%.

7. Середній термін служби абразиву з різних матеріалів представлений в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Термін служби та втрати абразиву [6]

Матеріали	Кількість повторних циклів використання	Безповоротні витрати, кг/год
Електрокорунд	10...30	3,0...5,0
Металевий дріб	60...100	1,0...1,3

Для забезпечення високої якості підготовки поверхні при струменево-абразивній обробці необхідно здійснювати періодичну заміну металевого дробу та видалення здрібненої частини у випадку застосування електрокорунду.

8. Шорсткість поверхні деталей, конструкцій чи виробів після струменево-абразивної обробки повинна складати $R_z = 10...160$ мкм у залежності від матеріалу основи та призначення покриття. Рекомендується формувати шорсткість з висотою мікровиступів, яка дорівнює три чверті діаметра часток напилюваного матеріалу.

9. Поверхні деталі, що не підлягають обробці, повинні бути захищені від впливу абразивних часток екранами з металу чи іншого абразивно-стійкого матеріалу (наприклад, гуми, фторопласта і т. п.).

10. Зона струменево-абразивної обробки повинна бути більше зони напилення на 2...3 мм із кожної сторони.

11. Струменево-абразивну обробку рекомендовано проводити в такому режимі:

- тиск стиснутого повітря 0,4...0,6 МПа;
- відстань від зрізу сопла пістолета до поверхні деталі 100...150 мм;
- кут нахилу сопла до поверхні деталі 60...90°.

12. На поверхні деталей після проведення струменево-абразивної обробки не допускається наявність блискучих ділянок. Ознакою добре підготовленої поверхні є рівномірний сіруватоматовий відтінок.

13. Абразивний матеріал вибирають у залежності від розміру оброблюваної деталі, форми й твердості її матеріалу. Наприклад, для підготовки поверхні перед нанесенням алюмінієвих і цинкових покриттів у залежності від товщини покриття застосовується різний абразив (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 - Вибір абразиву в залежності від матеріалу покриття та його товщини [6]

Матеріал покриття	Товщина покриття, мм	Абразивний матеріал	Зернистість абразивного матеріалу, мкм
Цинк Алюміній	Менше 0,20	Кварцевий пісок	370...830
	Менше 0,13	Металевий дріб	400...700
		Корунд	260...830
Цинк Алюміній	Більше 0,20	Кварцевий пісок	500...1400
	Більше 0,13	Металевий дріб	700...1000
		Корунд	430...1400

Контрольні запитання

1. Дайте характеристику струменево-абразивній обробці поверхонь. Чим вона відрізняється від інших способів підготовки поверхонь?

2. Які показники потрібно враховувати при проведенні струменево-абразивної підготовки поверхні щодо матеріалу деталі?

3. Яку шорсткість поверхонь виробів рекомендується формувати?

4. Як захищають поверхні, що не підлягають струменево-абразивній обробці?

5. У якому режимі рекомендовано проводити струменево-абразивну обробку?

7. Що є ознакою добре підготовленої поверхні?

8. Дайте характеристику поверхонь, що підготовлені різними способами. Визначте переваги та недоліки того чи іншого способу.

9. Як впливає спосіб обробки на міцність зчеплення?

Обладнання, інструменти, матеріали

1. Зразки-еталони для визначення та оцінювання шорсткості поверхонь.
2. Наждачний папір різної зернистості.
3. Зразки абразивних матеріалів (пісок, карбід кремнію SiC , карбід бору B_4C).

Вказівки з техніки безпеки

Струменево-абразивне оброблення являє великий ризик для здоров'я робітників, тому необхідно дотримуватись наступних правил:

1. Роботи виконувати тільки на справному обладнанні.
2. До роботи допускаються робітники тільки в спеціалізованому робочому одязі та взутті, а також з індивідуальними засобами захисту органів дихання, очей і слуху.
3. У якості засобів індивідуального захисту необхідно застосовувати відповідне взуття, спеціальний костюм для абразивно-струменевого оброблення, піско-струменевий шолом з примусовою подачею повітря, шкіряні робочі рукавиці, навушники.
4. Засоби індивідуального захисту органів дихання повинні захистити робітника від забрудненого навколишнього середовища та забезпечити співробітника чистим повітрям, яке подають із зовні.
5. Роботи виконуються тільки відповідно підготовленими фахівцями.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Вивчити будову та принцип роботи установки для струменево-абразивної підготовки поверхні.
2. Ознайомитися з процесом струменево-абразивної обробки та здобути навички роботи на установці.
3. Визначити шорсткість поверхонь оброблених дротів різними способами.
4. Визначити міцність зчеплення покриттів, напилених на поверхні, підготовлені різними способами, випробуванням на загин.

5. Виміряти кут загину зразка, при якому покриття починає відшаровуватися.

6. Отримані дані занести в таблицю 1.3.

Таблиця 1.3 - Результати вимірювання

Спосіб підготовки поверхні	Кут загину зразка, при якому відшаровується покриття

Порядок оформлення звіту

1. Коротко описати процес та зарисувати схеми обладнання для струменево-абразивної обробки поверхонь.

2. Зробити порівняльний аналіз щодо шорсткості зразків.

3. Подати результати дослідження впливу різних способів обробки поверхонь на міцність зчеплення покриття з основою випробуванням на загин.

4. Зробити висновки щодо впливу різних способів обробки поверхонь на міцність зчеплення покриття з основою.

Література

1. Дубовий О.М. Технологія газотермічного і вакуумно-конденсаційного нанесення покриттів: Підручник / О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров. – Миколаїв: видавець Торуба В.В., 2018. – 202 с.

2. Ильющенко А.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, Г.Ф. Громько. – Минск: Беларуская навука, 2011. – 357 с.

3. Дубовий О.М. Технологія напilenня покриттів: Підручник / О.М. Дубовий, А.М. Степанчук. – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.

4. Витязь П.А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов. – Минск: Беларуская навука, 2006. – 363 с.

5. Похмурський В.І. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгунік, Г.В. Похмурська, І.Й. Сидорак. – Львів: Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 2005. – 192 + вклейка 8 с.

6. Дубовий О.М. Збірник лабораторних робіт з дисципліни «Фізико-хімічні основи створення покриттів» і «Технологія нанесення покриттів» / О.М. Дубовий, Н.Ю. Лебедєва, С.М. Шумов – Миколаїв: НУК, 2004. – 76с.

Лабораторна робота № 2

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРИТТЯ

Мета роботи

Дослідити вплив параметрів режиму дугового наплавлення (довжина дуги, сила зварювального струму, час наплавлення) на витрату електродних матеріалів і характеристики покриття (ширина, висота, глибина проплавлення, структура, дефекти).

Загальні відомості

Загальні відомості до даної лабораторної роботи містять матеріали, що викладено в джерелах [1-6].

Наплавка металів - один з найбільш ефективних способів підвищення довговічності деталей машин - дозволяє відновлювати геометричні розміри зношених деталей, а також зміцнювати їх шляхом застосування спеціальних електродних матеріалів, які забезпечують отримання наплавленого шару з заданими фізичними властивостями.

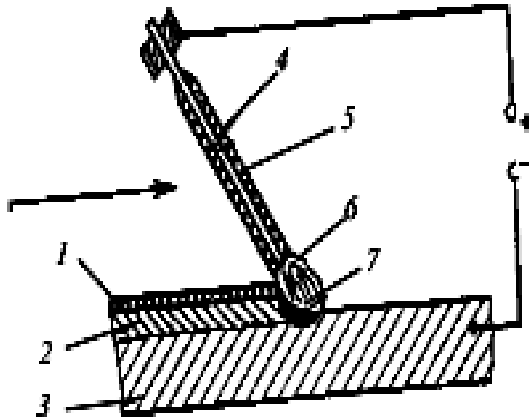
Наплавлення застосовують для відновлення та зміцнення деталей і конструкцій машин шляхом нанесення на їх робочі поверхні металевих покриттів, які володіють необхідним комплексом властивостей: зносостійкістю, термостійкістю, кислотостійкістю і ін. За допомогою наплавки утворюють біметалеві вироби, у яких вигідно поєднуються властивості наплавленого й основного металу.

Маса металу, яка наноситься на деталь, невелика і складає 2...6 % маси деталі, що визначає високу економічну ефективність наплавки, особливо при використанні механізованих способів.

У більшості випадків процеси наплавлення базуються на застосуванні дугового зварювання електродом, який плавиться. Відрізняються ці процеси засобами захисту металу, який наплавляється, від шкідливого впливу повітря та ступенем механізації, хоча сутність їх однакова. Вона полягає у тому, що під впливом високої температури електричної дуги, яка горить між

електродом і виробом, до яких підведено струм, електродний і основний метал розплавляються і створюють на поверхні виробу загальну ванну. З віддаленням електричної дуги розплавлений метал твердіє, утворює наплавлений валик.

Ручне наплавлення покритими електродами застосовують у тих випадках, коли використання механізованих способів неможливе або недоцільне (рис. 2.1).



1 - шлакова кірка; 2 - наплавлений валик; 3 - основний метал; 4 - електродний стержень; 5 - покриття електродного стержня; 6 - газощаковий захист; 7 - зварювальна ванна

Рисунок 2.1 – Схема процесу ручного наплавлення [4].

Для отримання мінімальної глибини проплавлення основного металу електрод нахиляють до сторони, яка протилежна напрямку наплавлення. Ручне наплавлення виконують електродами діаметром 2...6 мм при постійному струмі 80...300 А зворотної полярності (плюс на електроді) з продуктивністю 0,8...3,0 кг/год.

Головні параметри режиму ручного наплавлення: сила струму, напруга на дузі, швидкість наплавлення. Тип електрода вибирають в залежності від хімічного складу металу, який необхідно наплавити. Діаметр електрода визначають в залежності від товщини та форми виробу, просторового положення поверхні, яка наплавляється.

Масу наплавленого металу приймають

$$m_n = A_n \cdot I \cdot t,$$

де A_n - коефіцієнт наплавки, г/(А·год), який приймають в межах 7...14 г/(А· год); I - сила струму, А; t - час наплавлення, год.

Загальні втрати при напавленні покритими електродами з урахуванням втрат на угар та розбризкування складають до 30 %.

Дугова наплавка під флюсом - один з основних видів механізованого наплавлення. Головними перевагами являються безперервність процесу, висока продуктивність, незначні втрати, відсутність відкритого випромінювання дуги, що значно поліпшує умови праці. Електричну дугу 7 збуджують між електродним дротом 6 і основним металом (виробом) 11, які підключені до джерела струму (рис. 2.2). Підведення струму до електродного дроту здійснюється за допомогою мундштука 4. По мірі плавлення електродний дріт подається до зони дуги роликми 3 механізму подачі. Стійкий процес наплавки забезпечується за умови, якщо швидкість подачі електродного дроту рівна швидкості його плавлення. У процесі наплавки флюс з бункера 1 по шлангу 2 за допомогою воронки 5 потрапляє з надлишком до зони горіння дуги 8. Під дією теплоти дуги електродний і основний метал плавляться та утворюють на поверхні виробу ванну рідкого металу. Дуга частково розплавляє флюс, утворює зі шлаку навколо себе рідку еластичну оболонку, яка складається з парів флюсу, металу та продуктів хімічних реакцій, які протікають між ними. Еластична оболонка захищає дугу та рідкий метал від контакту з повітрям, майже зовсім виключає розбризкування та сприяє збереженню теплоти дуги. Розплавлений метал твердіє та утворює напавлений валик 12, який покритий шлаковою кіркою 9 та флюсом 10, що не розплавився.

Коефіцієнт наплавлення під флюсом майже рівний коефіцієнту розплавлення, оскільки втрати на розбризкування не перевищують 1,5 %. При застосуванні одного електродного дроту коефіцієнт наплавлення під флюсом складає 14...20 г/(А·год) і може бути підвищений за рахунок збільшення вильоту електрода. Загальні втрати при напавленні під флюсом не перевищують 3 %. Напавлення під флюсом здійснюють напівавтоматичними й автоматичними способами.

Наплавлення електродом в захисному газі. В якості захисного середовища замість флюсу використовують інертні або вуглекислий гази.

Захисний газ 2 (рис. 2.3) під тиском подається із сопла 1. Найбільш широке розповсюдження як захисний газ отримав аргон.

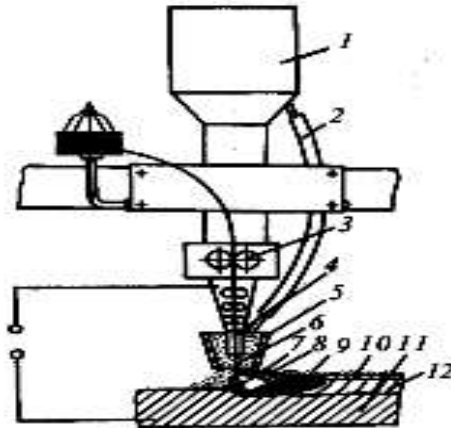


Рисунок 2.2 – Схема автоматичної наплавки під флюсом [4].

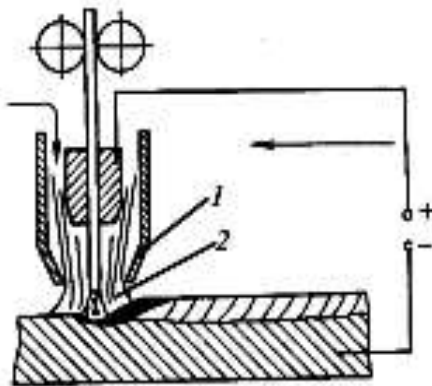


Рисунок 2.3 – Схема наплавки електродом, який плавиться в захисному газі [4].

Для відновлювання та зміцнення деталей застосовують різні наплавні матеріали, які можуть піддаватися різним видам зносу. Наплавні матеріали класифікують за видом і загальною кількістю легувальних елементів.

Низьковуглецеві низьколеговані сталі використовують для відновлення різних роликів, валів та інших деталей, а також для створення підшарку при наплавці зносостійких сплавів.

Вуглецеві низьколеговані сталі, які містять більше 0,4 % вуглецю і до 5 % легувальних домішок, застосовують для зносостійкого наплавлення штамів холодного та гарячого штампування, ножів бульдозерів.

Високомарганцеві аустенітні сталі, які містять до 13 % Mn, мають високу стійкість проти ударів і здатність загартуватися при деформації, в результаті чого твердість їх зростає до HB 450...500, при цьому серцевина залишається пластичною. Цими сталями наплавляють деталі дробильно-розмелювального устаткування, залізничні хрестовини та інші вироби, які працюють в умовах абразивного зносу з ударним навантаженням.

Хромисті сталі мають високу стійкість проти корозії та високу міцність при підвищених температурах. Застосовують при напавленні плунжерів гідропресів, штамів.

Нікелеві сплави мають високий опір зносу, а також жаростійкість і стійкість проти корозії.

Хромокобальтові сплави (стеліти) мають високу жароміцність, опір стиранню при температурі до 1000 °C. Їх застосовують для наплавки клапанів авіаційних двигунів, бурових доліт, матриць штамів.

Під впливом джерела теплоти присаджувальний метал плавиться, змішується з основним, утворює загальну ванну рідкого металу. По мірі віддалення джерела нагрівання рідка ванна кристалізується, утворює напавлений метал. Між напавленим металом та основним знаходиться зона термічного впливу (ЗТВ) - нерозплавлена ділянка основного металу, структура та властивості якої змінилися під впливом нагрівання. Структура ЗТВ неоднорідна, оскільки її ділянки нагріваються до різних температур, починаючи від температури плавлення і до ≈ 100 °C. ЗТВ при всіх способах наплавки неминуха, і незалежно від хімічного складу в ній можна відокремити три області: перша - область, яка характеризується

нагріванням до рідкого або твердо-рідкого стану; друга - відповідає температурі нагрівання, достатній для повного або часткового фазового перетворення; третя - область, у якій температура недостатня для протікання цих процесів, але в ній деформується метал під дією зварювальних напружень. Основний метал не зазнає пластичних деформацій, хоча в сталі й існують зварювальні напруження.

Будова та розміри ЗТВ залежать від способу наплавлення, хімічного складу й теплофізичних властивостей основного металу. У цій зоні можуть виникати дефекти, які знижують експлуатаційну здатність наплавленого металу, а в деяких випадках можуть викликати аварійний вихід деталі з ладу.

Найбільш розповсюджені при наплавці тріщини. Їх поділяють на гарячі (кристалізаційні), холодні та навколо шовні.

Гарячі тріщини виникають в процесі первинної кристалізації наплавленого металу, тому їх розташування співпадає з напрямком росту стовбчастих кристалів.

Холодні тріщини виникають в наплавленому металі при порівняно невисокій температурі($\approx 200^{\circ}\text{C}$). Їх характерна риса - уповільнений розвиток протягом декількох годин і навіть діб.

Відповідно до причин появи дефектів їх розділяють на дві групи. До першої відносяться дефекти, які утворюються у зв'язку з особливостями металургійних і теплових процесів наплавки: тріщини, пори, шлакові включення. До другої групи відносять дефекти, які виникають через порушення режиму наплавлення, несправність устаткування, низьку кваліфікацію зварювальників (підрізи, напливи, відвороти).

Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте процес дугового наплавлення.
2. Які способи наплавлення Вам відомі?
3. Які матеріали використовуються при дуговому напавленні?
4. Які принципи вибору хімічного складу наплавленого металу?
5. Як утворюється наплавлений метал? Назвіть особливості його структури.
6. Які дефекти можуть бути в наплавленому металі?
7. У яких межах знаходяться втрати на угар та розбризкування при дуговому напавленні різними способами?

8. Що таке коефіцієнт наплавлення A_n ? В чому його фізична сутність?

Обладнання, інструменти, матеріали

1. Джерело живлення для зварювання на змінному (постійному) струмі.
2. Амперметр для вимірювання сили зварювального струму.
3. Вольтметри для вимірювання напруги на дузі та на вході джерела живлення.
4. Електроди наплавочні типу ИТС-01, Т-590.
5. Зразки для нанесення покриття – пластини з маловуглецевої сталі товщиною 8...10 мм.
6. Штангенциркуль.
7. Лабораторні електронні ваги з точністю $\pm 0,01$ г.

Вказівки з техніки безпеки

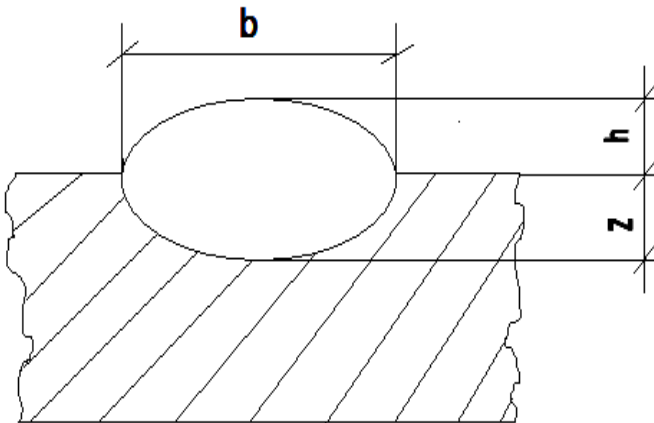
1. Перед початком роботи упевнитися в повній справності обладнання, цілісності та якості ізоляції струмопровідних частин.
2. Перед початком робіт з нанесення покриття ввімкнути витяжну вентиляцію.
3. Процес вести лише, стоячи на гумовому килимку, у спеціальному одязі та взутті, які надійно захищають від нагрітих металевих бризок і теплового випромінювання.
4. Спостерігати за процесом наплавлення дозволяється лише через спеціальні світлофільтри, використовуючи зварювальні щитки, маски або шоломи.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з наплавочним і вимірювальним обладнанням.
2. До проведення робіт з наплавлення необхідно:
 - підготувати (зачистити та обезжирити) зразки;
 - промаркувати всі зразки;
 - зважити кожен із зразків, а також наплавочні електроди.

3. Під час нанесення покриттів на кожен зразок визначати за приладами та фіксувати напругу холостого ходу $U_{\text{хх}}$, силу струму короткого замкнення $I_{\text{кз}}$, а також фактичні $I_{\text{зв}}$ і $U_{\text{о}}$.

4. Провести нанесення покриття впродовж визначеного часу (наприклад 5 або 10 с) короткою та довгою дугою. Для цього задіяти 2 зразки, а нанесення проводити за однією технологічною схемою. Процес починати розпалюванням електрода на графітовій пластині та тільки після стабілізації процесу переносити його на зразки. Після закінчення наплавлення зразкам дати охолонути, після чого зважити їх та залишки електродів, якими виконували наплавлення. Після зважування зразки розрізати посередині абразивним кругом та обміряти характерні параметри нанесеного шару (рис. 2.4).



b – ширина нанесеного шару; h – висота; z – глибина проплавлення

Рисунок 2.4 – Схема наплавленого шару у поперечному перерізі.

Усі отримані дані занести до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати вимірювань

Хар-ка дуги	Режими наплавлення		Маса зразків, г			Маса електроду, г			Параметри наплавленого шару, мм		
	U_o , В	$I_{зв}$, А	до-	після	Δ	до-	після	Δ	b	h	z
коротка											
довга											

Примітка:

1. Напруга холостого ходу $U_{xx} = ___\text{ В}$;
2. Час наплавлення $t = ___\text{ с}$.

5. Провести нанесення покриття впродовж визначеного часу при різному струмі зварювання (наприклад, 200 та 260 А). Провести дослідження аналогічні п.4. Усі отримані дані занести до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати впливу $I_{зв}$ на процес нанесення та параметри наплавленого шару

Режими наплавлення		Маса зразків, г			Маса електроду, г			Параметри наплавленого шару, мм		
$I_{зв}$, А	U_o , В	до-	після	Δ	до-	після	Δ	b	h	z

Примітка:

1. Напруга холостого ходу $U_{xx} = ___\text{ В}$;
2. Час наплавлення $t = ___\text{ с}$.

6. За отриманими даними зробити розрахунки по визначенню коефіцієнта наплавки A_n г/(А · год) за формулою:

$$A_n = \frac{m_n}{I_{зв} \cdot t},$$

де m_n - маса наплавленого металу, г; I_{36} - сила зварювального струму, А; t - час наплавлення, год.

7. Провести металографічне дослідження мікрошліфів нанесеного покриття.

Зміст звіту

1. Коротко дати характеристику електродугового наплавлення, його особливостей та галузей застосування.

2. Навести таблиці 2.1 і 2.2 з результатами вимірювань, а також розрахунки по визначенню коефіцієнта наплавки A_n для обох випадків. Оцінити втрати металу при різних режимах нанесення.

3. Описати, які зміни відбуваються з якістю покриття та мікроструктурою при застосуванні різних режимів нанесення.

4. Зробити висновки щодо впливу режиму дугового наплавлення на характеристики покриття.

Література

1. Геворкян Е.С. Интегрированные технологии обработки материалов [Текст]: підручник / Е.С. Геворкян, Л.А. Тимофеева, В.П. Нерубацький, О.М.Мельник. – Харків: Укр ДУЗТ, 2016. – 238с.

2. Витязь П.А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов. – Минск: Беларуская навука, 2006. – 363 с.

3. Корж В.М. Нанесення покриття: Навч. посібник / В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко; за ред. К.А. Юценка. – К.: Арістей, 2005. – 204 с.

4. Дубовий О.М. Збірник лабораторних робіт з дисципліни «Фізико-хімічні основи створення покриттів» і «Технологія нанесення покриттів» / О.М. Дубовий, Н.Ю. Лебедева, С.М. Шумов – Миколаїв: НУК, 2004. – 76с.

5. Збожна О.М. Основы технологии: Навчальний посібник / О.М. Збожна. – Тернопіль: Карт-бланш, 2002. – 486с.

6. Хасуй А. Наплавка и напыление / А. Хасуй, О. Моричаки; пер. с яп. В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

Лабораторна робота № 3

ВИБІР РЕЖИМІВ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ МЕТОДОМ

Мета роботи

Ознайомитися з будовою, принципом роботи установок та процесами нанесення електродугових покриттів; навчитися вибирати оптимальні режими напилення.

Загальні відомості

Загальні відомості до даної лабораторної роботи містять матеріали, що викладено в джерелах [1-5].

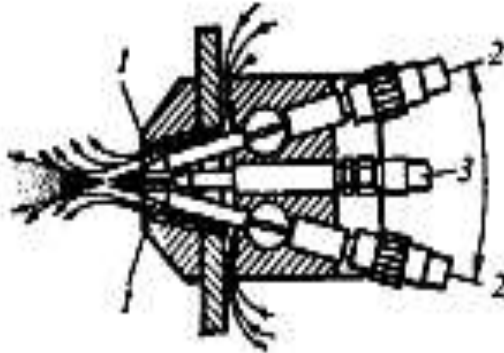
Технологія нанесення покриттів складається з підготовки поверхні, нанесення покриття, та, у випадку необхідності, його наступної обробки. Значення параметрів шорсткості поверхні виробу, вимоги до термічного напилювання покриття та методи контролю повинні відповідати ГОСТ 9.304-84.

Підготовка поверхні має на меті вилучити з неї різні забруднення та окисну плівку, а також додати їй необхідної шорсткості, тобто розпилюваний метал (за винятком молібдену та деяких інших) з гладкою поверхнею зчіплюватися не може.

Для тіл обертання інколи застосовується підготовка поверхні нарізанням "рваної різьби" (глибина нарізання та крок різьби 0,8...1,0 мм), накатка, а також нанесення підшарка з молібдену, алюмідонікелю. Підготовлену поверхню слід металізувати не пізніше двох годин після закінчення підготовки. Принципова схема електродугового напилення показана на рис. 3.1; 3.2.

Як джерело енергії для нагрівання та подрібнення матеріалу, який напилюється, використовується електрична дуга. Через два канали у електрометалізатор безперервно подають два дроти (діаметром 1,5...3,2 мм), між кінцями яких збуджується електрична дуга та здійснюється розплавлення дроту. Розплавлений метал підхоплюється струменем стиснутого повітря, яке витікає із центрального сопла електрометалізатора, і у дрібно розплавленому вигляді переноситься на поверхню основного матеріалу. Розпилення

та транспортування розплавленого металу здійснюється повітрям, хоча при напилюванні корозійностійких сталей і алюмінієвих сплавів використовують азот.



1 - насадка; 2 - місце вводу напиленого матеріалу (дроту); 3 - місце подачі стиснутого повітря

Рисунок 3.1 – Схема електродугового напилення [4, 5].

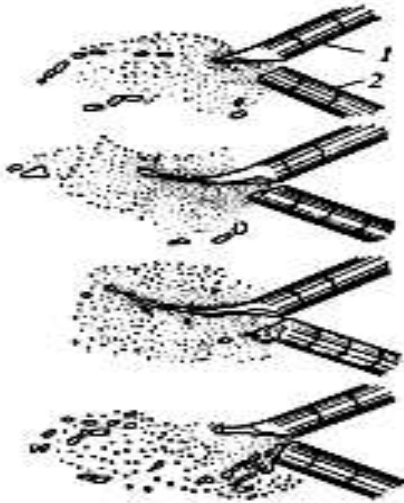
На рис. 3.2 наведена схема розплавлення електродного дроту при напилюванні та перенесенні частинок розплавленого металу повітряним струменем. Температура дуги залежить від виду газу, складу електродного дроту, режимів напилення та інших параметрів. При використанні металевих електродів і силі струму 280 А досягається температура приблизно 6100 ± 200 К. При такій температурі легше утворюється крапля матеріалу, що напилюється.

В дузі виділяють три області проходження струму: стовп дуги, анодну та катодну плями. Розміри останніх малі і керувати ними важко, в той час як довжина стовпа дуги може бути значною і нею легко керувати, змінюючи напругу.

Вигляд торця оплавленого суцільного електродного дроту після різкого припинення розпилення свідчить, що фронт плавлення знаходиться біля площини, нормаль якої пересікається з віссю електрода під деяким кутом φ (рис.3.3). Цей кут може змінюватися від 0 до $\varphi_{\max} = 90^\circ - \varpi/2$, де ϖ - кут схрещування осей електродів.

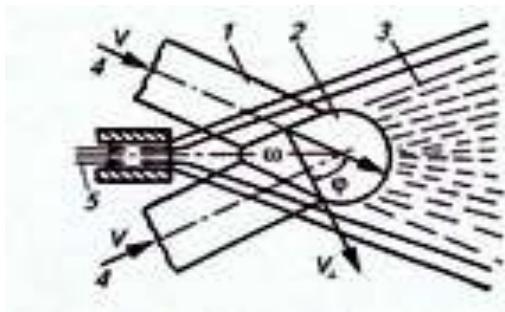
Зі зміною режимів розпилення змінюється площа плавлення: якщо швидкість подачі електродів постійна, то з ростом напруги на

дузі кут φ зменшується; з підвищенням швидкості подачі електродів він збільшується, прямуючи до свого максимального значення.



1 - анод; 2 - катод

Рисунок 3.2 – Процес розплавлення та перенесення електродного напиленого матеріалу [5].



1 - електроди; 2 - дуга; 3 - потік розпиленого металу; 4 - напрямок подачі електродів; 5 - розпилювальний газ

Рисунок 3.3 – Схема наплавлення та розпилення електродів [2].

Стабільне розпилення відповідає режиму горіння дуги без коротких замикань, коли між середньою швидкістю переміщення фронту плавлення і швидкістю подачі електродів встановлюється динамічна рівновага. За такого режиму газовий потік видаляє з електродів та розпилює порції рідкого металу ще до їх зіткнення і короткого замикання. Далі розплавлений метал знову нагромаджується на торцях електродів і цикл повторюється. Поряд з періодичним викидом порцій металу із міжелектродного проміжку під час металізації спостерігається також безперервне стікання перегрітого металу з торців електродів. Це пояснюється тим, що за сильного перегріву розплавленого металу сили поверхневого натягу в ньому зменшуються і під дією потоку розпилювального газу розплав безперервно стікає з торців без короткого замикання.

Розплавлена краплина, що покинула торець дроту, продовжує диспергуватись під час польоту. Розмір більшості розпиленних частинок цинку, алюмінію, сталі, олова, латуні знаходиться в межах від 1 до 100 мкм.

На дисперсність напиленого металу впливає енергія повітряного потоку, яка, в свою чергу, залежить від діаметра повітряного сопла і може бути виражена формулою

$$d_{\varphi} = K_i (3,75 / R_0 + 0,29) \sqrt[3]{Q\gamma / \mu^2},$$

де R_0 - радіус сопла, мм; K_i - коефіцієнт розмірності;

Q - продуктивність напилення, кг/с; γ - щільність розпиленого металу, кг/м³.

Розмір частинок суттєво залежить від тиску повітря (табл. 3.1).

Окрім суцільних дротів при електродуговому напиленні часто використовують порошкові дроти (ПД). Металева оболонка ПД плавиться від тепла Джоуля та випромінювання в активних зонах дуги - катодній та анодній плямах, що локалізуються на торцях оболонки. Шихта ПД, електропровідність якої становить $\leq 10\%$ від провідності оболонки, в основному поглинає тепло від випромінювання - плавиться внаслідок теплопередачі від розплаву оболонки. Тугоплавкі компоненти шихти - порошки карбідів, боридів, силіцидів, нітридів, оксидів металів - при цьому можуть не плавитись. Вони загущують та підвищують в'язкість розплаву, що евакуується з торця електродного

матеріалу, і утруднюють диспергування розплаву.

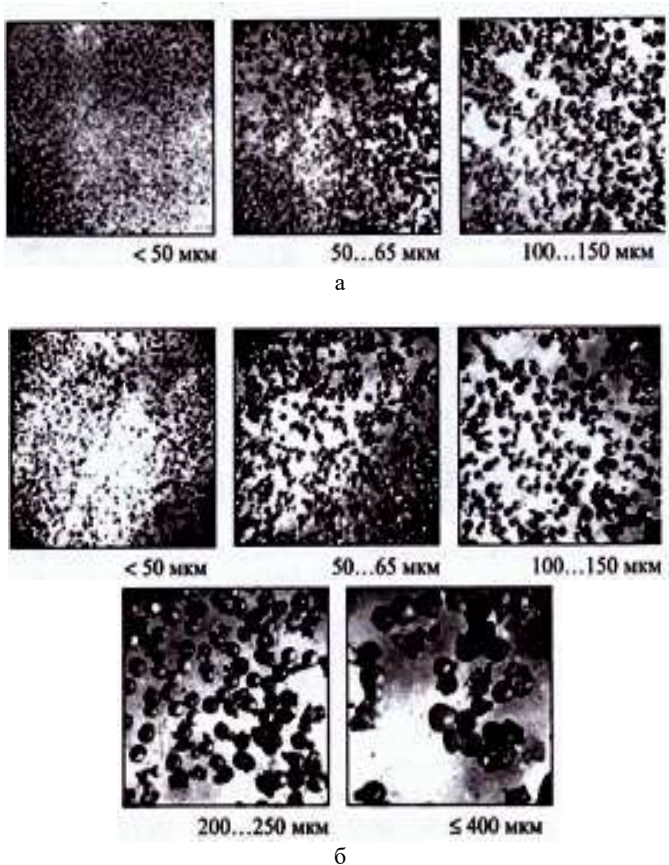
Таблиця 3.1 – Розміри частинок сталі та їх відносна кількість під час розпилення

Розмір частинок, мкм	Сумарний об'єм частинок (в %) від загальної кількості розпиленого металу за тисків повітря в магістралі, МПа		
	0,7	0,5	0,3
1000	-	-	Незначна кількість
500	-	-	Незначна кількість
350	Незначна кількість	Незначна кількість	Незначна кількість
250			80,50
150			2,90
100	20,20	10,12	4,73
75	45,50	29,70	5,40
50	31,95	35,00	6,00
35	1,92	2,08	0,29
10	0,43	0,35	0,18

Як наслідок, розмір розпилених частинок значно більший, ніж утворених під час розпилення суцільного дроту. Зокрема, якщо за однакових умов металізації ($P = 0,6$ МПа, $I = 150$ А, $U = 35$ В) максимальний розмір розпилених частинок із ПД з шихтою (60% ФХБ + 40% Al) становить 400 мкм, то з суцільного дроту зі сталі У8 – він 100 мкм (рис. 3.4).

Найбільшими є краплини з високою в'язкістю, оскільки тугоплавкі компоненти шихти не встигають повністю розчинитись у малов'язкому розплаві матеріалу оболонки.

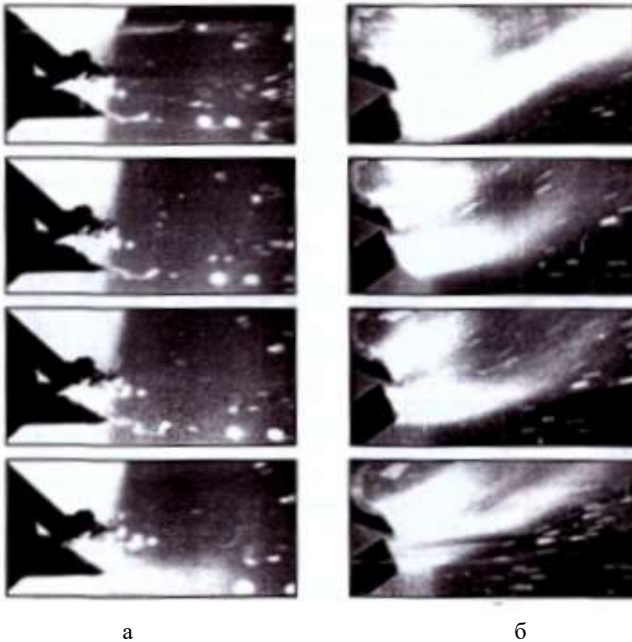
Під час нанесення покриттів з ПД зафіксовано два механізми утворення краплин з розплаву: поодинокий (рис. 3.5а) та множинний (рис. 3.5б). Поодинокий реалізується тоді, коли робочий струм під час горіння дуги в межах 70...200 А. Робоча напруга при цьому не повинна перевищувати 40 В. В міру надходження дроту в зону плавлення розплавлений метал утворює краплину, яка відривається від торця дроту. Розмір краплини залежатиме, в першу чергу, від в'язкості розплаву, тобто від компонентного складу шихти ПД.



а – з суцільного дроту зі сталі У8; б – з ПД 60%ФХБ + 40% *Al*

Рисунок 3.4 – Розподіл застиглих краплин металевого розплаву за фракціями [2].

Що тугоплавкіші компоненти входять у шихту ПД, то більшого діаметра краплина відриватиметься від електродів. Множинне утворення краплин реалізується насамперед тоді, коли робоча напруга перевищує 50 В, а струм - 200 А. При цьому підвищуються температура розплаву металу і тиск іонізованого газу. Всі ці фактори змінюють картину масопереносу.



а – поодинокі формування краплин; б – множинне

Рисунок 3.5 – Швидкісна кінозйомка (8500 кадрів/с) послідовності плавлення ПД та диспергування металевого розплаву за диференційної схеми розпилення [2].

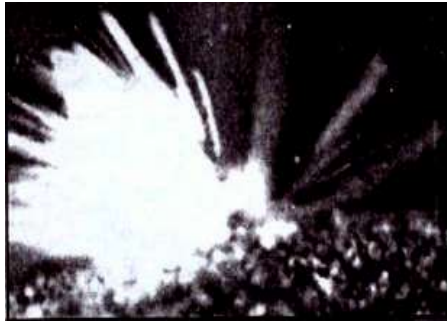
На торцях дроту з'являється багато язичків-протуберанців з рідкого металу які, втрачаючи рівновагу, утворюють відразу багато краплин. Розміри частинок після диспергування змінюються в досить широких межах - 1...1000 мкм. На рис. 3.4 показано всі фракції застиглих металевих краплин (діаметром від <50 до ≈ 400 мкм), які суттєво відрізняються і швидкістю польоту. Всі частинки мають доволі правильну сферичну форму. Однак багато з них містять всередині порожнечу. Серед частинок є прозорі кульки, які можуть бути оксидами. Це може свідчити про те, що під час диспергування розплаву оксиди, які є на поверхні шихтових матеріалів у вигляді тоненької плівки, у розплаві спливають, утворюючи шлакову фазу. Це також підтверджується магнітним розділенням цих фаз.



а



б



в

а, б – діаметр до 50 мкм; в – більше 200 мкм

Рисунок 3.6 – Швидкісна кінозйомка (8500 кадрів/с) контактування краплин металевого розплаву з поверхнею напилення [2].

Швидкісною кінозйомкою (8500 кадрів/с) зафіксовано механізм формування покриттів під час контакту розплавлених частинок з поверхнею напилення в момент удару (рис. 3.6). Показано, що середні і великі краплини за динамічного контакту з поверхнею металу розбризкуються (рис. 3.6а). Частина металу залишається на поверхні, а частина - у вигляді вторинних дрібних краплин відривається від поверхні і покидає зону контакту, або вже з малою швидкістю осідає на поверхні і бере участь у формуванні покриття. Краплини розміром

від 5...50 мкм (рис. 3.6б) мають високу швидкість польоту в момент удару об поверхню, швидко кристалізуються і практично не розбризкуються.

Якість напилюваного покриття та ефективність процесу здебільшого залежить від обраного режиму роботи апарата. Режим роботи апарата встановлюється оператором у залежності від джерела електричного живлення, використовуваного матеріалу, діаметра дроту, тиску стиснутого повітря. Зі збільшенням тиску стиснутого повітря на вході в апарат щільність покриття зростає, підвищується стабільність роботи апарата. Тому для одержання оптимальних результатів необхідно працювати на максимальному тиску стиснутого повітря (0,5...0,6 МПа/см²). При різких коливаннях тиску повітря у результаті відбору повітря іншими споживачами роботи з металізації проводити не треба. Напруга встановлюється в залежності від вимог, поставлених до покриття.

Коли антикорозійне покриття з цинку й алюмінію працює у звичайних умовах, то напилювання слід проводити при можливо меншій напрузі. Величина робочого струму приблизно пропорційна обраній продуктивності розпилення.

Вибір режиму зробити за табл. 3.2.

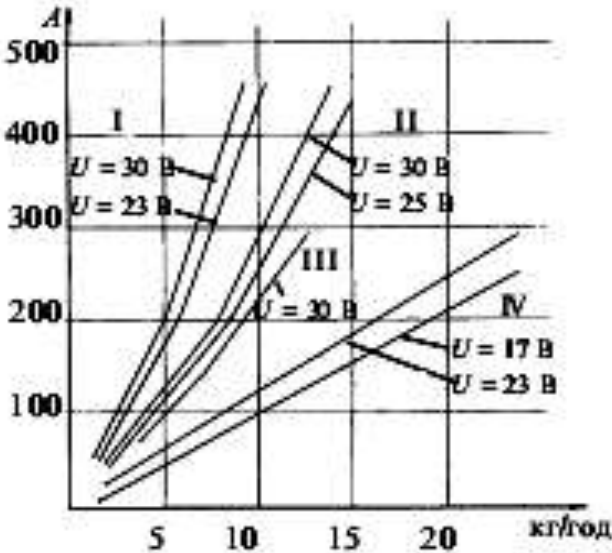
На рис. 3.7 і 3.8 наведені графіки для визначення продуктивності за робочим струмом. Вибір продуктивності розпилення визначається технічною доцільністю. При виконанні робіт вручну, коли нанесення покриттів здійснюється на великі поверхні і доступ до них зручний, не слід закладати в розрахунок вибору режиму продуктивність розпилення цинку більше 10...15 кг/год, а алюмінію - 5...7 кг/год через фізичні можливості людини.

Таблиця 3.2 – Напруга дуги для напилення різних матеріалів [2]

Матеріал дроту	Інтервал напруг на дузі, В
Цинк	17...23
Алюміній та його сплави	23...30 і 40
Сталь	25...30
Мідь	25...35
Молібден	27...35

У стаціонарних умовах при механізації процесу в розрахунок можна закладати більш високу продуктивність розпилення.

Відстань від точки плавлення дроту до металізованої поверхні слід витримувати в границях 80...120 мм. При механізації процесу рекомендується застосовувати меншу дистанцію напилювання, оскільки підвищується коефіцієнт використання металу при напилюванні.

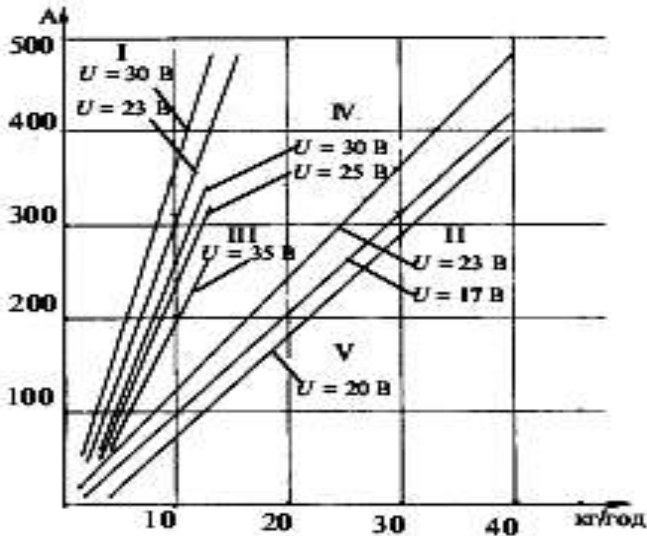


I - алюміній та його сплави; II - сталь маловуглецева; III - молібден; IV – цинк

Рисунок 3.7 - Графік визначення продуктивності розпилення дроту $\varnothing 1,5...1,6$ мм [5].

При нанесенні покриття необхідно запобігати нагріванню металізованої поверхні вище 70...80 °С. Товщина шару при нанесенні покриття на плоских поверхнях не повинна перевищувати 0,35...0,50 мм. Для тіл обертання при відновленні зношених поверхонь або при нанесенні антифрикційних покриттів товщина шару може досягати декількох міліметрів.

Наступна механічна обробка покриттів через невеликі механічні властивості повинна проводитись на понижених режимах з обов'язковим застосуванням емульсії.



I - алюміній та його сплави; II - цинк; III - молібден; IV - сталь маловуглецева;
V - цинк для дроту $\varnothing 2,5$ мм

Рисунок 3.8 – Графік визначення продуктивності розпилення дроту $\varnothing 2$ мм [5].

Електродугове напilenня має ряд переваг. Застосування потужних електрометалізаційних установок дозволяє значно підвищити продуктивність процесу та скоротити витрати часу. Наприклад, при силі струму 750 А можна напилувати стальне покриття з продуктивністю 36 кг/год, а при силі струму 500 А - цинкове покриття з продуктивністю 1,2 кг/хв, що у декілька разів перевищує продуктивність газополуменевого напilenня. У порівнянні з газополуменевим напilenням електрометалізація дозволяє отримати більш міцне покриття, яке краще з'єднується з основою. При використанні в якості електродів дротів із двох різнорідних металів можна отримати покриття із їх сплаву. Такі сплави називають псевдосплавами. Експлуатаційні витрати при електродуговому напильованні невеликі.

До недоліків електродугового напilenня відносяться можливість перегрівання та окислення матеріалу, який напильється

при малих швидкостях подачі дроту. Крім того, велика кількість теплоти, яка виділяється при горінні електричної дуги, призводить до значного вигорання легувальних елементів, які входять до сплаву, що напилюється (наприклад, вміст вуглецю у покритті зменшується на 40...60 %, а силіцію і марганцю – на 10...15 %).

Контрольні запитання

1. Дайте характеристику процесу нанесення покриттів електродуговим методом (ЕДМ).
2. Які витратні матеріали застосовуються при ЕДМ?
3. Назвіть основні технологічні параметри процесу електродугового напилення.
4. Дайте характеристику джерелу енергії електродугового напилення.
5. Що і як впливає на розмір частинок напилюваного матеріалу?
6. Які покриття наносять електродуговим напиленням?
7. Яким чином продуктивність напилення залежить від величини робочого струму?
8. Як визначається продуктивність процесу?
9. Назвіть переваги електродугового напилення.
10. Назвіть недоліки електродугового напилення.

Обладнання, інструменти, матеріали

1. Установка для електродугового напилення покриттів КДМ-2.
2. Металографічні мікроскопи МІМ-7 та МІМ-8.
3. Мікротвердомір ПМТ-3.
4. Набір макро- та мікрошліфів.
5. Каталог матеріалів для нанесення покриттів.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з будовою та принципом роботи установок для електродугового напилювання покриттів.
2. Ознайомитись з технологією нанесення електродугового покриття.

3. Дослідити вплив режимів нанесення на розмір напилюваних часток, продуктивність розпилення та міцність зчеплення покриття з основою.

Зміст звіту

1. Коротко описати процес електродугового напилювання та зарисувати схему головної частини електрометалізатора.

2. Коротко описати матеріали, які застосовуються при електродуговому напиленні.

3. Проаналізувавши дані таблиці 3.1 для різних тисків повітря в магістралі (0,3 МПа; 0,5 МПа; 0,7 МПа) під час розпилення побудувати графіки залежності «відносна кількість частинок певних розмірів (%) – загальна кількість розпиленого металу за розмірами частинок (МКМ)».

4. Проаналізувавши графіки визначення продуктивності розпилення дротів різних діаметрів для різних матеріалів (див. рис.3.4) зробити висновок, як впливають на продуктивність розпилення показники електричних складових режиму нанесення.

5. На підставі даних табл. 3.3 побудувати залежність міцності зчеплення покриття від кута подачі електродних дротів.

6. Зробити висновки щодо впливу на якість електродугового напиленого покриття різних факторів.

Таблиця 3.3 – Результати досліджень адгезійних властивостей покриття від кута подачі електродних дрітів

Напилюваний матеріал та характеристика основи	Кут між дротами α , °	Режими електродугового напилення			Міцність зчеплення покриття з основою, МПа
		Напруга на дузі, В	Тиск транспортного повітря, МПа	Дистанція напилення, мм	
Порошковий дріт Ni +20% Al Ø1,8 мм; Основа – шліфована вуглецева сталь	15	32	0,5	150	18,5
	30				27,0
	45				29,0
	70				38,0

Література

1. Дубовий О.М. Технологія газотермічного і вакумно-конденсаційного нанесення покриттів: Підручник / О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров. – Миколаїв: видавець Торуба В.В., 2018. – 202 с.
2. Похмурський В.І. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгунік, Г.В. Похмурська, І.Й. Сидорак. – Львів: Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 2005. – 192 + вклейка 8 с.
3. Дубовий О.М. Технологія напилення покриттів: Підручник / О.М. Дубовий, А.М. Степанчук. – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.
4. Витязь П.А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов. – Минск: Беларуская навука, 2006. – 363 с.
5. Дубовий О.М. Збірник лабораторних робіт з дисципліни «Фізико-хімічні основи створення покриттів» і «Технологія нанесення покриттів» / О.М. Дубовий, Н.Ю. Лебедєва, С.М. Шумов – Миколаїв: НУК, 2004. – 76с.

Лабораторна робота № 4**ГАЗОПОЛУМЕНЕВЕ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ І
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ НАПИЛЕННЯ НА ЇХ ВЛАСТИВОСТІ****Мета роботи**

Вивчити будову та принципи роботи установки для газополуменевого порошкового напилення покриттів. Дослідити вплив технологічних параметрів напилення на міцність зчеплення покриттів з основою.

Загальні відомості

Загальні відомості до даної лабораторної роботи містять матеріали, що викладено в джерелах [1-6].

Газополуменеві та електродугові покриття за класифікацією і за способом отримання відносяться до газотермічних покриттів. Газотермічні покриття отримують із нагрітих і прискорених частинок порошку або розпиленого компактного матеріалу із застосуванням високотемпературного газового струменю, при співударі яких з основою або напиленим матеріалом формується покриття за рахунок зварювання, адгезії та механічного зчеплення.

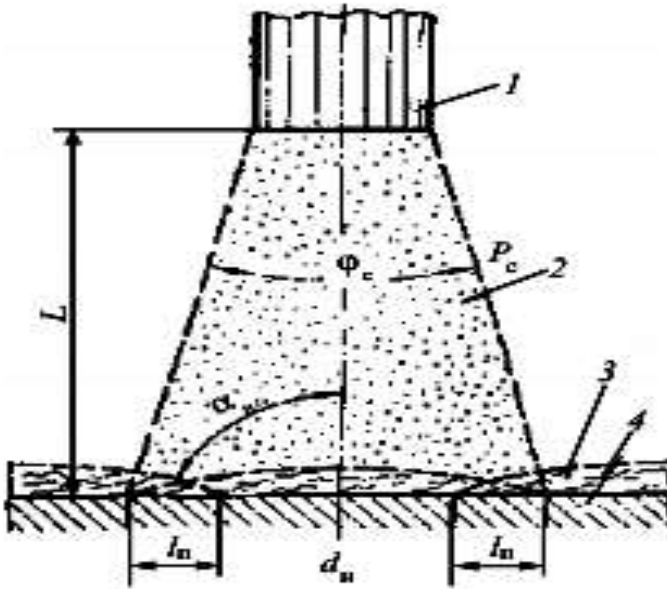
Газотермічне напилення покриттів характеризується узагальненою схемою (рис. 4.1).

Основні параметри процесу такі: дистанція напилення - L ; конус розпилення - φ_c ; тиск навколишнього середовища - P_c ; кут зустрічі потоку з поверхнею - α_n ; d_n - діаметр плями напилення; величина перекриття проходів - l_n ; температура виробу, на який напилюється покриття, - T_g .

Газотермічне напилення покриттів характеризується також багатьма технологічними параметрами, які розділяють на такі групи:

- конструктивні параметри пристроїв, що розпилюють;
- параметри, які характеризують режим роботи розпилювача;

- параметри, які пов'язані з матеріалом, що розпилюється;
- параметри, які характеризують умови напilenня покриттів;
- параметри струменя при напilenні покриттів.



1 - генератор часток; 2 - струмінь; 3 – напилене покриття; 4 - виріб з покриттям

Рисунок 4.1 – Узагальнена схема процесу газотермічного напilenня покриттів [1, 4].

Якість покриттів характеризується багатьма показниками. Найбільш значимими є показники міцності: адгезійна σ_a і когезійна σ_k міцність. Ці показники, в основному, визначають надійність напilених покриттів. При оцінці якості велику увагу приділяють щільності покриттів $\gamma_{нк}$ і пов'язаній з нею пористості Π . До складу критеріїв якості входять також шорсткість поверхні покриттів R_z ; рівномірність товщини $\delta_{нк}$; однорідність складу; макро- та мікроструктура. Узагальнюючим якісним показником покриттів є експлуатаційні властивості.

Ефективність використання енергії для розпилення матеріалу визначають відношенням зміни ентальпії потоку напилених часток $\Delta H_{н.ч}$ до загальних витрат енергії W_e :

$$\eta_{e.p} = \frac{\Delta H_{н.ч}}{W_e},$$

де $\eta_{e.p}$ - енергетичний ККД процесу розпилення.

При напилюванні тільки частина потоку часток переходить у покриття. Для оцінки втрат матеріалу, що розпорошується, застосовують коефіцієнт використання матеріалу

$$K_m = \frac{G_n}{G_p},$$

де G_n , G_p - відповідно маси напиленого та розпиленого матеріалу.

З урахуванням K_m енергетичний ККД процесу напilenня запишеться так:

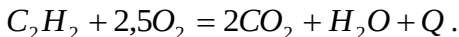
$$\eta_{e.n} = \frac{\Delta H_{н.ч}}{W_e} \cdot K_m.$$

У залежності від методу напilenня $\eta_{e.p}$, $\eta_{e.n}$ та K_m знаходяться в широких межах - від сотих часток до десятих часток.

Продуктивність процесу напilenня є найважливішим показником ефективності. В основному вона залежить від величини енергії, що подається, а також значень $\eta_{e.n}$ і K_m . Продуктивність напilenня оцінюють ваговим методом чи по товщині покриттів.

Як джерело енергії для нагрівання та прискорення частинок матеріалу, який утворює покриття, найчастіше використовується енергія горіння газів і пари рідких палив у суміші з киснем або повітрям. Переважно застосовуються вуглеводневі гази типу C_nH_m або їх суміш, і найбільш розповсюджений серед них – ацетилен (C_2H_2). Основні властивості горючих газів наведені в таблиці 4.1.

Повне згорання ацетилену іде за реакцією



Теплота реакції згорання ацетилену Q складається з теплоти реакції екзотермічного розпаду ацетилену та суми теплот первинних реакцій згорання вуглецю та водню. Значення теплотворної здатності наведено в таблиці 4.1. Процес горіння ацетилену має декілька стадій. Стадія підготовки пального до згорання характерна наявністю пірогенного (теплого) розкладання ацетилену в рівновазі з киснем, який протікає в ядрі полум'я. Пірогенне розкладання виникає внаслідок обмеженої теплової стійкості вуглеводнів. Пальне розкладається на складові елементи: вуглець і водень (C і H_2). Кінцевим продуктом пірогенного розкладання ацетилену за наявності кисню, який надходить із пальника і називається первинним, є CO і H_2 .

Для пірогенного розкладання на один об'єм ацетилену потрібен один об'єм кисню. Полум'я з таким складом газової суміші називається нормальним. Практично через те, що невелика кількість водню згорає із утворенням водяної пари за рахунок кисню горючої суміші і через деяку забрудненість кисню, який надходить із пальника, співвідношення кисню й ацетилену встановлюється трохи більшим за одиницю:

$$\beta = \frac{V_k}{V_a} = 1,15 \dots 1,20,$$

де V_k - об'єм кисню, m^3 ; V_a - об'єм ацетилену, m^3 .

Стадія займання проходить в середній зоні полум'я та характеризується процесом активного окислення CO і H_2 до вуглекислого газу CO_2 і водяної пари H_2O . Момент переходу процесу в стадію активного окислення і є процесом горіння.

Стадія догорання проходить в зоні факела полум'я і характеризується процесом окислення продуктів пірогенного розкладання ацетилену в кінцеві продукти CO_2 і H_2O . Процес догорання іде із вторинним киснем, тобто за рахунок кисню навколишнього середовища.

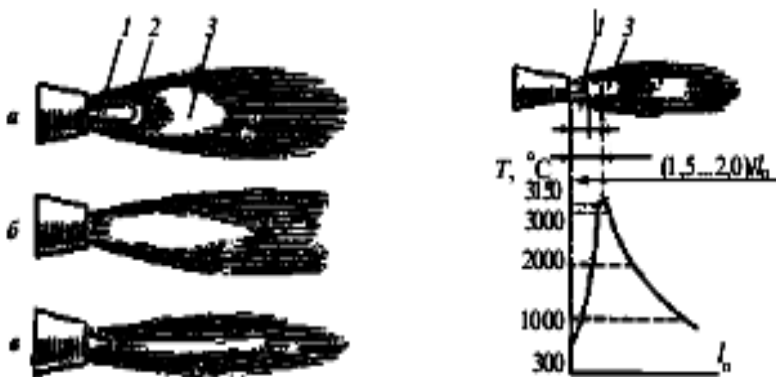
Наведені стадії процесу горіння характеризуються також зміною температурного стану суміші. На 1-й стадії, яка проходить у ядрі полум'я, іде підвищення температури займання.

Таблиця 4.1 – Властивості горючих газів [6]

Вид пального	Густина при 20° С i 0,1 МПа, кг/м ³	Теплотворна здатність (20° С, 0,1 МПа), кДж/м ³	Температура полум'я суміші із киснем, °С	Швидкість розповсюд- ження полум'я, м/с	Співвідношення кисню до пального у нормальному полум'ї
Ацетилен C ₂ H ₂	1,09	52920	3100...3200	13,5	1,15
Водень Н ₂	0,084	10080	2100	8,9	0,40
Метан СН ₄	0,67	33600	2400	3,3	2,0
Природний газ	0,68...0,90	31500...37800	2000...2200	3,1...3,3	1,0...1,5
Пропан	1,88	87360	2700...2800	3,7	3,5...4,0
Бутан	2,54	116760	2400...2500	-	3,5...4,0

На 2-й стадії (середня зона полум'я) температура різко підвищується від температури займання до максимальної (близько 3150 °С) температури полум'я. На 3-й стадії (факел) іде зниження температури (рис. 4.2).

Полум'я суміші ацетилену та кисню прийнято поділяти на нормальне, окислювальне та відновлювальне. Але практично, нейтральне полум'я ($\beta = 1,1 \dots 1,2$) інтенсивно протидіє окисленню, а відновлювальне (полум'я із надлишком ацетилену) - не відновлює метал, а насичує його вуглецем. Отримання теоретично нейтрального полум'я, яке при даному складі, температурі й тиску не окислює і не відновлює метали, досить складна і малоімовірна річ.



а - нормальне полум'я; б - відновлювальне; в - окислювальне

Рисунок 4.2 - Форма, будова ацетилено-кисневого полум'я та діаграма розподілу температури в зонах [6].

Технологічні особливості газополуменового наплення покриттів.

Узагальнена схема процесу газополуменового нанесення покриття показана на рис. 4.3.

Горючий газ і кисень (рідко повітря) подається до сопла 1. На виході із нього суміш підпалюється і утворює факел газового полум'я 2. Порошок за допомогою транспортуючого газу (здебільшого це повітря) подається вздовж осі газополуменового струменя. Частинки порошку взаємодіють з газовою фазою, яка складається з горючих

газів, продуктів їх згорання та дисоціації кисню і повітря. Газополуменевий струмінь нагріває та прискорює частинки порошку. При цьому формується газопорошковий струмінь, який утворює покриття 3 на виробі 4. Матеріал, що напилюється, надходить на поверхню основи у вигляді потоку рідких крапель або обплавлених пластичних частинок; вони удараються об неї і закріплюються за рахунок зварювання та механічного зчеплення, утворюючи покриття.

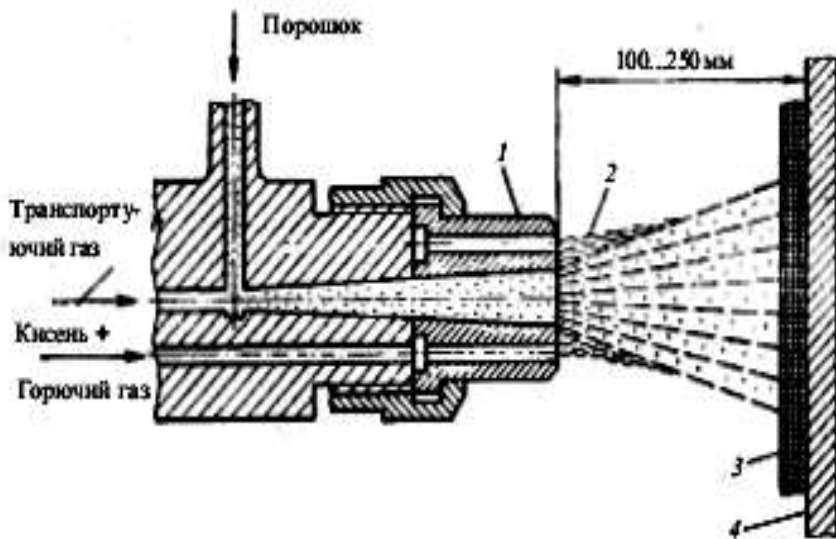


Рисунок 4.3 – Схема газополуменевого напилення порошкового матеріалу [6].

Установки газополуменевого напилення включають наступні основні елементи (рис. 4.4): газополуменевий пальник для розпилення порошку 1 чи дроту (прутка) 2 і нанесення покриття; пристрій подачі напилювального матеріалу в газове полум'я (для напилення порошків - це порошковий дозатор 3, а для дроту - бухта 4, механізм подачі дроту або прутка - це повітряна турбіна або електродвигун, розташований безпосередньо на пальнику), пристрої для контролю та керування витратами й тиском газів (манометри та редуктори 6, витратоміри 5), систему подачі газів (газові балони 11, шланги 12, компресор для подачі стиснутого повітря 10, ресивер 8, осушувач 7, теплообмінник 9). Осушувач і теплообмінник можуть бути встановлені на магістралі стиснутого повітря з метою видалення вологи й мастила з повітря.

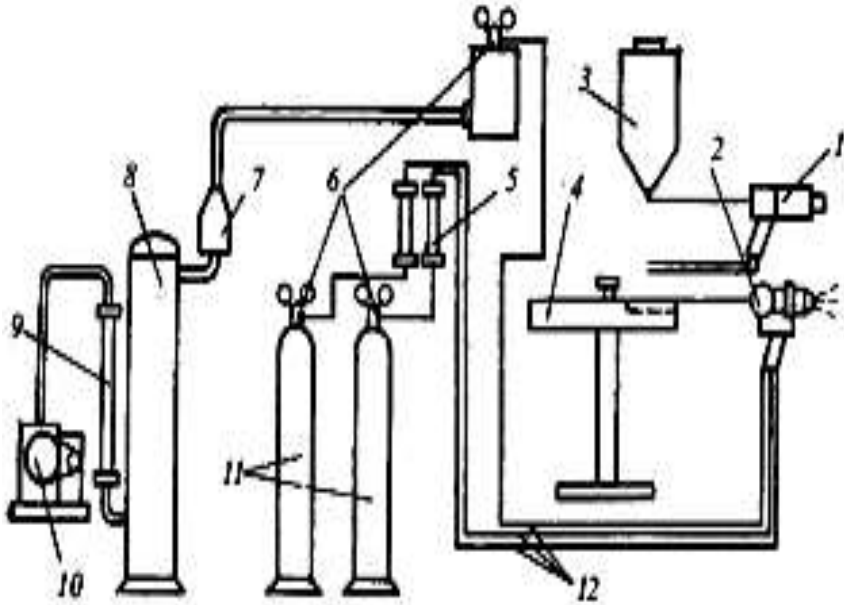


Рисунок 4.4 - Схема установки для газополуменового напылення покриттів із порошків або прутків [6].

Параметри, що характеризують зовнішні умови напылення.

Для газополуменового процесу це, насамперед, дистанція напылення. Вплив цього параметра аналогічний іншим методам газотермічного напылення та складає 100...200 мм.

Параметри струменя і потоку напылених часток. Максимальна температура полум'я поблизу зрізу сопла складає 3273...3473 К і залежить, в основному, від роду горючого газу та величини β . Швидкість газополуменових струменів складає 150...300 м/с і визначається витратою горючого газу, значеннями β і профілюванням сопла. У ряді випадків досягається надзвукова швидкість витікання. Склад газового полум'я, в основному, визначається значеннями β .

Зміна температури, ентальпії, швидкості та складу по осі струменя й у перетинах аналогічна плазмовим струменям. Довжина високотемпературної частини газополуменового струменя залежить від роду горючого газу, його витрати й β . Для ацетилену та пропанбутанової суміші довжина складає 70...150 мм. Верхня межа

відноситься до максимальних витрат горючого газу й оптимальних значень β .

Температура напилюваних часток при порошкових способах напилення не перевищує 2473 К. Дротове напилення може забезпечити частки з більш високою температурою порядку 2973 К. Швидкість часток поблизу поверхні напилення знаходиться в межах 20...100 м/с і вище. Щільність потоку напилюваних часток складає 103...105 ч./($\text{с} \cdot \text{см}^2$).

Газополуменеве напилення використовується для нанесення покриттів різного призначення за допомогою розпилення порошкових і дровових матеріалів. Цей метод не забезпечує можливість нанесення тугоплавких матеріалів. При порошковому напилюванні температура матеріалу, що розпиться, обмежена, приблизно 2473 К, при дрововому напилюванні - 2973 К.

Робочим інструментом спеціаліста з нанесення покриттів газополуменевим способом є пальник ГН-3. Пальник наплавочний великої потужності ГН-3, технічна характеристика якого наведена в таблиці 4.2, призначений для ручного наплавлення ацетиленокисневим полум'ям порошкових гранульованих самофлюсувальних сплавів, що наносяться з метою відновлення зношених і зміцнення нових великогабаритних деталей, виправлення дефектів лиття (рис. 4.5).

Таблиця 4.2 – Технічна характеристика пальника ГН-3 [6]

Найменування показника	Норма
Тиск ацетилену, МПа (кгс/см^2)	Не більше 0,02 (0,2)
Тиск кисню, МПа (кгс/см^2)	0,3...0,4 (3...4)
Витрата ацетилену, л/год	1500...1750
Витрата кисню, л/год	1500...1750
Витрата порошку при беззупинній подачі в полум'я, кг/год	Не менше 5
Коефіцієнт використання порошку при напиленні на сталеву пластину розміром 200×120×10 мм	$0,7 \pm 0,05$
Маса пальника (без порошку в бункері), кг	Не більше 1,1
Габаритні розміри, мм	Не більше 615×225×75

Пальник складається зі стовбура 9, наконечника 2 і пристрою подачі порошку 7. До стовбура за допомогою накидної гайки 8 через перехідник 15 приєднується пристрій подачі порошку. У перехіднику між пристроєм подачі порошку та стовбуром встановлений інжектор 14 першого ступеня інжекції.

Пристрій подачі порошку містить у собі бункер 4, важільний механізм 6, що забезпечує пуск і припинення подачі порошку, та пристрій подачі повітря в суміш 13. До пристрою подачі порошку за допомогою накидної гайки 12 кріпиться наконечник, що складається зі змішувальної камери 11 з інжектором 13 другого ступеня інжекції.

Кисень від джерела живлення по гумотканинному рукаві через штуцер з ніпелем надходить до регулювального вентиля 16 і далі по інжектору першого ступеня інжекції. При витіканні кисню через вузький канал інжектора в порожнині каналу створюється розрядження, що сприяє при натисканні на рукоятку важільного механізму 5 надходженню з бункера порошкових гранульованих сплавів.

Киснево-порошкова суміш надходить у канал інжектора, тобто у другий ступінь інжекції і далі в змішувальну камеру наконечника і створює розрядження в каналах горючого газу пальника, достатнє для всмоктування ацетилену в об'ємі, рівному чи трохи більшому від об'єму подаваного кисню.

У трубці 1 наконечника відбувається змішування киснево-порошкової суміші з ацетиленом, яка утворює горючу суміш, що надходить у вихідний канал мундштука 10, на виході з якого суміш кисню з ацетиленом згорає, забезпечуючи як нагрівання поверхні, на яку наплавляється до необхідної температури, так і оплавлення гранул порошку.

Пристрій для підсмоктування повітря призначено для додаткового всмоктування повітря з атмосфери в суміш, що трохи знижує максимальну температуру ядра полум'я, але одночасно збільшує його довжину, що забезпечує більш тривале перебування порошку в зоні нагрівання і більше тепловкладення в нього. Крім того, інжектування суміші повітрям підвищує безпеку роботи пальника.

Регулювання витрати порошку здійснюється за допомогою регулювального гвинта, що знаходиться на корпусі вузла подачі порошку.

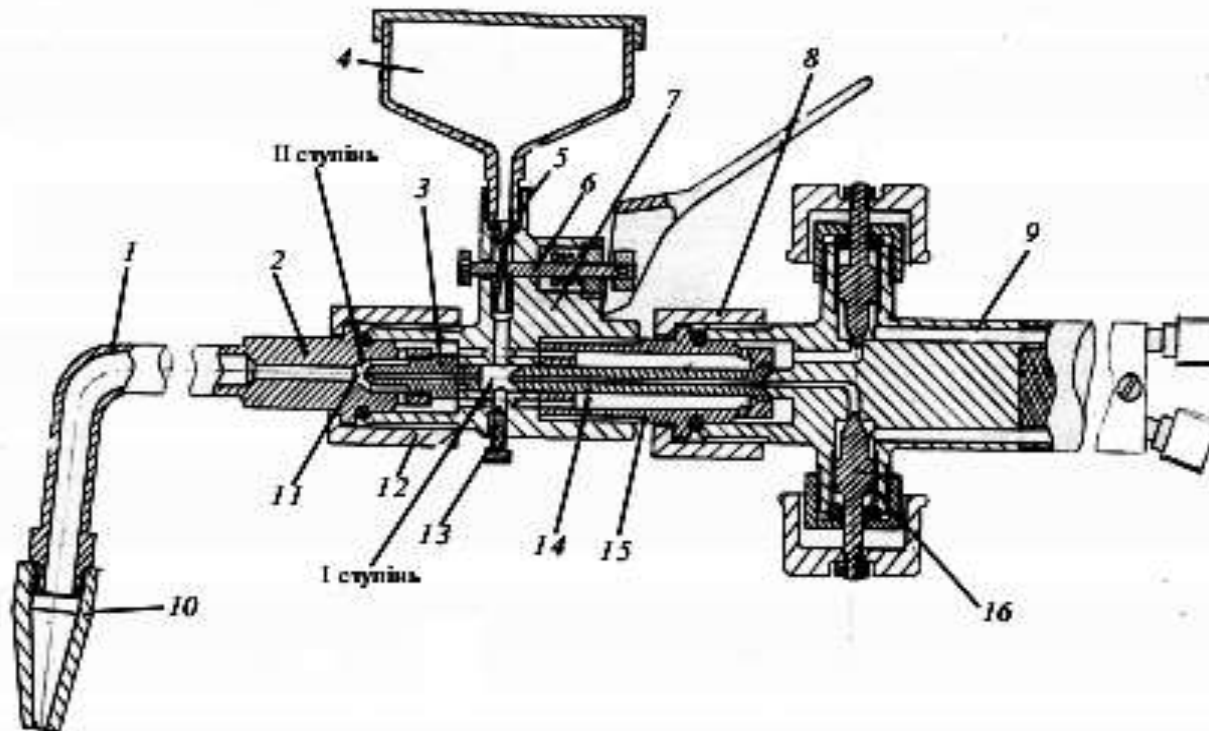
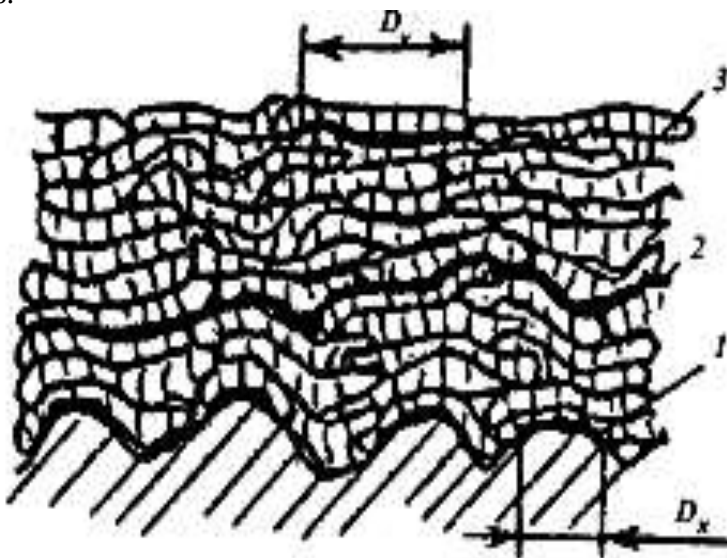


Рисунок 4.5 - Схема пальника ГН-3 [6].

Перед початком роботи пальника необхідно підготувати поверхню, на яку наносять покриття, одним з наступних способів: струменево-абразивним, механічним (точінням, фрезеруванням), зачищенням металевою щіткою. На поверхнях, що піддаються напilenню, не допускається наявність слідів мастил, жиру, окалин та інших видів забруднення. У процесі напilenня поверхня завжди повинна бути у горизонтальному положенні. Для цього необхідно передбачити можливість безупинного чи періодичного переміщення (обертання) деталі в процесі напilenня.

Схематична структура газотермічних покриттів зображена на рис. 4.6.



1 - межа між покриттям і основою; 2 - межа між шарами покриття; 3 - межа між частинками; D_x - діаметр ділянки контакту, на якій відбувається приварювання частинки

Рисунок 4.6 – Схема структури покриттів [6].

Трьом типам границь відповідають три типи структурних елементів: основа, на яку наносять покриття, напилений шар матеріалу та дисперсна частинка матеріалу в кінцевому стані – після розпилення, удару й твердіння. Будова шару, який формується за один прохід, або "гірку", яка отримується напilenням у нерухому пляму, є

неоднорідною внаслідок нерівномірності розподілу температури та швидкості частинок матеріалу за перерізом потоку. Утворення покриття послідовним укладанням великої кількості частинок із різною температурою, швидкістю, агрегатним станом, масою неминує веде до характерної лускатої будови із зернистими включеннями і мікропорожнинами - порами.

Газополуменеві покриття мають відкриту пористість до 10...15%, а міцність зчеплення з основою близько 30 МПа.

До недоліків методу варто віднести: невисоку продуктивність процесу, особливо при порошковому напилюванні тугоплавкими матеріалами; наявність у струмені активних газів, які взаємодіють з металевими і металоподібними матеріалами; невисока якість покриттів при напилюванні ряду порошкових матеріалів; низькі значення енергетичного ККД нагрівання частинок порошку.

До переваг методу належать: наявність нескладного та недорогого устаткування; високі значення коефіцієнта використання матеріалу (КВМ) при дротовому розпиленні.

Контрольні запитання

1. Дайте загальну характеристику процесу нанесення газотермічних покриттів.
2. Наведіть основні технологічні параметри процесу газотермічного напилення.
3. Дайте характеристику джерелам енергії газополуменевого напилення.
4. Як відрізняють нормальне, окислювальне та відновлювальне полум'я за складом суміші ацетилену і кисню?
5. Що таке КВМ і як він визначається?
6. Які гази використовуються для газополуменевого напилення? Чим відрізняються їхні властивості?
7. На які зони поділяється газове полум'я та яка температура у цих зонах?
8. Які матеріали використовуються при газополуменовому напиленні?
9. Яким чином потрібно запалювати пальник ГН-3 і встановлювати робочий факел полум'я?

10. Як впливає товщина покриття на міцність зчеплення та режим напилування?

11. Наведіть основні переваги та недоліки газополуменового способу нанесення покриттів.

Обладнання, інструменти, матеріали

1. Установка для газополуменового порошкового напилування покриттів (ацетиленовий і кисневий балони з відповідними редукторами; з'єднувальні шланги).

2. Пальник ГН-3.

3. Порошковий матеріал ПН85Ю15.

4. Сталеві заготовки розміром $2 \times 30 \times 50$ мм.

Вказівки з техніки безпеки

1. Перед початком роботи упевнитися в цілісності газових балонів, справності редукторів і шлангів.

2. Перед початком роботи ввімкнути витяжну вентиляцію.

3. Упевнитися у відсутності мастила на гайках кисневого балону.

4. Балони відкривати без ударів за потребою спеціальним ключем.

5. Роботи проводити у спеціальному одязі на відстані не ближче 10 м від балонів.

6. Спостерігати за процесом нанесення покриттів допускається лише через спеціальні окуляри – світлофільтри.

7. Приступати до роботи дозволяється тільки після ознайомлення з принципами роботи обладнання та вимогами техніки безпеки.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з порядком роботи на установці для газополуменового нанесення покриттів.

Для цього, в першу чергу, зробіть наступне:

- Перевірте правильність приєднання шлангів до стовбура.

- Перед приєднанням ацетиленового шланга перевірте наявність розрядження (підсмоктування) в ацетиленових каналах пальника. Для цього треба відкрити вентиль регулювання витрат кисню.

- Запаліть і відрегулюйте полум'я в такій послідовності:
 - встановіть тиск кисню й ацетилену в робочих камерах редукторів відповідно до технічної характеристики;
 - повністю відкрийте вентиль кисню та перевірте розрядження в каналі бункера при натиснутому важелі;
 - заповніть бункер на 2/3 об'єму порошковим сплавом;
 - відкрийте на 1/4 оберту кисневий і на 1 оберт ацетиленовий вентиля та запаліть суміш.

Потім, по черзі відкриваючи кисневий і ацетиленовий вентиля пальника, відрегулюйте полум'я заданої потужності та складу. **Категорично забороняється** встановлювати нормальне полум'я в початковий період регулювання при недостатній потужності, щоб уникнути зворотного удару полум'я в пальник.

При повністю відкритому ацетиленовому вентилі в полум'ї повинен з'явитися помітний надлишок ацетилену. Для напilenня можуть бути застосовані сплави, одержувані способом розпилення чи сфероїдизації, з розміром часток 40...100 мкм.

Перед початком напilenня натисканням важеля перевірте наявність подачі порошку (за зовнішнім виглядом полум'я), після чого можна робити напilenня. Відстань від пальника до напильованої поверхні повинна складати 200...300 мм. Необхідно розігріти поверхню, на яку наноситься покриття, до температури "відпрівання" без розплавлення основного металу.

При гасінні полум'я спочатку закрийте ацетиленовий вентиль, а потім кисневий.

У випадку утворення зворотного удару погасіть пальник, охолодіть наконечник, підтягніть мундштук і накидні гайки.

По закінченні робіт натисніть на важіль і притисніть його до стовбура.

2. Ознайомитися з процесом нанесення газополумєневих покриттів.

3. Дослідити вплив режиму напilenня та товщини покриття на міцність зчеплення його з основою випробуванням на загин.

4. Виміряти кут загину зразка, при якому покриття починає відшаровуватися.

5. Отримані дані занести в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 - Результати вимірювань

Номер зразка	Тиск		Вид полум'я	Товщина покриття, мм	Кут загину, при якому відшаровується покриття
	кисню	ацетилену			

Зміст звіту

1. Коротко описати процес газополуменевого порошкового напилювання покриттів і матеріали, які при цьому використовуються.

2. Навести схему газополуменевого напилення порошкового матеріалу.

3. Перерахувати основні технологічні параметри напилювання.

4. Навести таблицю з результатами випробувань.

5. Зробити висновки щодо впливу технологічних параметрів газополуменевого напилювання на якість покриття.

Література

1. 1. Дубовий О.М. Технологія газотермічного і вакуумно-конденсаційного нанесення покриттів: Підручник / О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров. – Миколаїв: видавець Торуба В.В., 2018. – 202 с.

2. Ильющенко А.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, Г.Ф. Громько. – Минск: Беларуская навука, 2011. – 357 с.

3. Витязь П.А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов. – Минск: Беларуская навука, 2006. – 363 с.

4. Дубовий О.М. Технологія напилення покриттів: Підручник / О.М. Дубовий, А.М. Степанчук. – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.

5. Корж В.М. Нанесення покриття: Навч. посібник / В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко; за ред. К.А. Юценка. – К.: Арістей, 2005. – 204 с.

6. Дубовий О.М. Збірник лабораторних робіт з дисципліни «Фізико-хімічні основи створення покриттів» і «Технологія нанесення покриттів» / О.М. Дубовий, Н.Ю. Лебедева, С.М. Шумов – Миколаїв: НУК, 2004. – 76с.

Лабораторна робота № 5

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ НА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ВЛАСТИВОСТІ

Мета роботи

Ознайомитись з технологією нанесення гальванічних покриттів; вивчити вплив величини струму на якість покриття, його товщину та міцність зчеплення з основою.

Загальні відомості

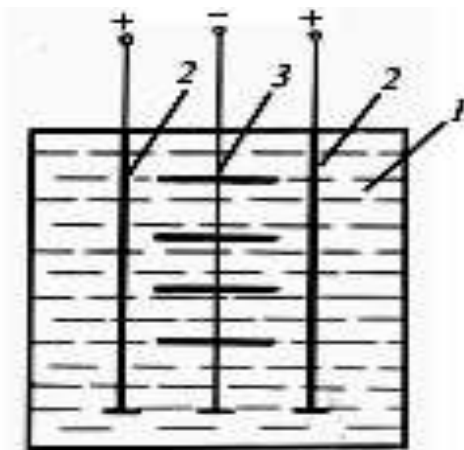
Загальні відомості до даної лабораторної роботи містять матеріали, що викладено в джерелах [1-7].

Спосіб електролітичного осаджування найбільш розповсюджений в машинобудуванні, оскільки дозволяє отримувати при незначних витратах металу різні покриття, які міцно утримуються на поверхні. Узагальнена схема нанесення покриттів представлена на рис. 5.1. Осаджування відбувається у ваннах з розчином електроліту, який містить іони металу, що осаджуються. Деталі, які покривають, завантажують на катод у коло постійного струму, що живить ванну.

Анодом у більшості випадків служать пластини металу, з якого отримують покриття. На аноді він розчиняється, а на катоді осаджується з розчину. Завдяки цьому в розчині зберігається потрібна концентрація іонів металу.

Осаджувані під струмом покриття мають кристалічну будову і міцність їх тим більша, чим менший розмір кристалів, які утворюються.

Для електроосадження застосовують переважно сірчаноокислі та ціаністі електроліти. Ціаністі ванни токсичні, мало стабільні й дають менший вихід металу за струмом, ніж сірчаноокислі. Для збільшення розсіювальної здатності та зменшення розмірів кристалів покриття, в електроліт вводять спеціальні колоїдні добавки (клей, желатин, декстрин та ін.).



1 - ванна з електролітом; 2 - аноди; 3 - катод з виробами

Рисунок 5.1 - Узагальнена схема електролітичного нанесення покриттів [4].

Металеві покриття широко застосовують у промисловості, в основному їх наносять на металеві поверхні, а в ряді випадків і на неметалічні матеріали.

Металеві покриття наносять на метали в основному для захисту від корозії. За принципом захисної дії розрізняють анодне та катодне покриття. Анодні покриття мають у водневому розчині електролітів більш негативний електрохімічний потенціал, ніж захищений метал, а катодні - більш позитивний.

При наявності в покритті пор або пошкоджень на поверхні утворюються мікропори з покриття та металу, який захищається. В мікропорах руйнуються ділянки з більш електронегативним потенціалом (аноди). Таким чином, якщо пористе покриття анодне, то воно руйнується, перешкоджаючи тим самим руйнуванню металу. Пористі катодні покриття не руйнуються, а прискорюють руйнування металу, на який вони нанесені, тим більше, чим більша різниця потенціалів між покриттям і основним металом, і чим більш електропровідне навколишнє середовище. Тому катодні покриття можна застосовувати тільки за відсутності в них наскрізних пор.

Металеві покриття не тільки захищають від корозії, але й надають поверхні гарного зовнішнього вигляду, твердості, зносостійкості, електропровідність, відбивальної здатності та інших властивостей.

Покриття цинком є найбільш розповсюдженими, оскільки анодні покриття добре захищають метал від атмосферної корозії. Їх наносять переважно на сталь, також на мідь, латунь, а іноді на алюміній. Покриття мають сірий колір. Для блискучого цинкування використовують блискоутворювач (натрієві солі, сірчаний натрій, гліцерин та ін.). Блискучі покриття мають підвищену корозійну стійкість і мало забруднюються (сліди від пальців, підтікання і т. п.). Крім того, цинк із такого електроліту можна осаджувати на алюміній і його сплави. Блискучими цинковими покриттями в деяких випадках можна замінити декоративні нікелеві.

Цинкові покриття мають середню твердість за Брінелем 50...60; при низьких температурах стають крихкими, погано піддаються паянню та зварюванню.

У вологому повітрі й у воді цинк покривається шаром основної вуглекислої солі білого кольору, яка захищає його від подальшого руйнування. У воді при температурі 65 °С захисні властивості цинку різко погіршуються. Цинк взаємодіє з сірководнем і сірчаними сполуками, в кислотах і лугах він руйнується.

Цинкові покриття застосовують для захисту арматури, деталей для кріплення та профільованих деталей; для попередження небезпечних контактів сталевих і мідних деталей з деталями з інших металів; для захисту труб, резервуарів від дії води, бензину, гасу. Товщина покриття – від 3 до 50 мкм. Після цинкування деталі освітлюють шляхом занурення на 2-3 с в розчин азотної або хромової кислоти з додаванням сірчаної.

Для підвищення міцності цинкового покриття промиті й висушені деталі проходять термічну обробку при температурі 230...250 °С протягом 2 год з метою виведення водню. Для збільшення захисної здатності цинкові покриття підлягають ароматній пасивації з занурюванням у розчин біхромату натрію або калію. При цьому покриття набувають золотистого або райдужного переливчастого жовто-зеленого забарвлення. При нагріванні вище 100 °С пасивувальна плівка руйнується.

Якщо цинкові покриття мають тьмянний блиск, роблять хімічне полірування. Поверхня стає блискучою з трохи синюватим відтінком, який нагадує хром. Інтенсивність блиску залежить від якості підготовки поверхні сталі після полірування. Оцинкована поверхня не забруднюється і має високу корозійну стійкість. Статичний коефіцієнт тертя її знижується.

Покриття міддю мають красивий рожевий колір і легко поліруються, набуваючи інтенсивного блиску. Однак на повітрі вони порівняно швидко темніють, тому як декоративні покриття їх не застосовують. Мідні покриття непридатні також для захисту сталі та інших металів від корозії, бо вони окислюються. Під дією сірчаных сполук мідь забарвлюється в темний колір. У лугах мідь стійка, за виключенням аміаку. У кислотах руйнується, особливо швидко в азотній і хромовій. Мідні покриття витримують вигинання, розвальцьовування, глибоку витяжку, добре піддаються лудінню, паянню, зварюванню.

Мідні покриття застосовують в основному як підшар під нікелеві, хромові, срібні та інші види покриттів. Завдяки здатності добре поліруватися, такий підшар широко використовується для отримання покриття з високими відбивальними властивостями і дозволяє зменшувати наскрізну пористість покриття. Крім того, мідні покриття застосовують для захисту від науглецьовування окремих ділянок поверхні деталі в процесі цементації, для притирання поверхонь деталей верстатів, механізмів, для зменшення шуму при терті, для наступного оксидування покриття та хімічного пофарбування при отриманні декоративного покриття.

Добра електропровідність міді дозволяє застосовувати її як підшар під срібло для струмопровідних жил при виготовленні друкарських схем і біметалічних провідників. Товщина мідних покриттів залежить від їх призначення. Підшар міді, який наносять під яке-небудь покриття, має товщину 5...30 мкм, шар міді для захисту від науглецьовування - 20...40 мкм.

Для отримання мідних покриттів частіше за все застосовують сірчаноокислі або ціаністі електроліти з додаванням, якщо це потрібно, блискоутворювача. Твердість покриття в ціаністих ваннах дорівнює НВ 120...150, а в сірчаноокислих - 60...80. Швидке осаджування товстих шарів міді відбувається в борфтористоводневих електролітах, які мають дещо кращу розсіювальну здатність, ніж сірчаноокислі.

Недоліком сірчаноокислих і борфтористоводневих електролітів, крім крупнозернистості покриття і низької розсіювальної здатності, є погане зчеплення міді, яка осаджується, з поверхнею сталевих деталей. Для забезпечення міцного зчеплення попередньо наносять підшар міді товщиною 3...5 мкм з ціанистого розчину або підшар нікелю 1...3 мкм, а потім нарощують мідне покриття в сірчаноокислому або борфтористоводневому розчині.

Для отримання покриття дрібнодисперсної будови і прискорення процесу міднення застосовують реверсивний спосіб, періодично змінюючи напрямок струму. Реверсивне міднення можна проводити в кислих і ціанистих електролітах.

Покриття нікелем мають сріблястий колір з жовтуватим відтінком, вони добре поліруються і набувають дзеркального блиску. Цей блиск поступово втрачається, якщо повітря забруднене сірчаними газами.

Покриття мають дрібнокристалічну будову, але в шарах товщиною до 25 мкм - пористі. Оскільки шар нікелю є по відношенню до сталі катодним покриттям, намагаються уникнути утворення наскрізних пор шляхом потовщення шару нікелю або нанесенням підшару міді.

На мідні та латунні деталі нікель осаджують без підшарів. Твердість звичайних нікелевих покриттів дорівнює 250...270 кг/мм². Покриття нікелем дозволяють дещо згладити мікронерівності поверхні. Вони дуже стійки до лугів, в органічних кислотах не розчиняються. Руйнуються в сірчаній, соляній, а особливо швидко в азотній кислоті. Покриття добре витримують нагрівання, за виключенням підігрівання газовими пальниками. Нікелеві покриття широко застосовують як захисно-декоративні для оздоблення деталей і арматури вагонів, автомашин, велосипедів, приладів, а також виробів широкого вжитку.

М. Фарадей встановив, що кількість хімічної речовини, яка виділилася на електродах, прямо пропорційна кількості електрики, яка пройшла крізь електроліт.

Якщо, наприклад, крізь електроліт пропустити струм силою 1 А впродовж 1 год, то на катоді виділиться така ж кількість металу, яка виділиться при проходженні струму силою 10 А впродовж 0,1 год.

М. Фарадей також встановив, що кількість речовин, які виділяються на електродах однаковими кількостями електрики,

відносяться між собою як хімічні еквіваленти цих речовин. Еквівалентна маса дорівнює атомній масі поділеній на валентність. Так, наприклад, атомна маса срібла дорівнює 107,88, а так як срібло одновалентне, то еквівалентна маса його становить також 107,88. Атомна маса міді становить 63,57, мідь двовалентна, тому її еквівалентна маса $63,57:2=31,78$.

Для виділення грам-еквівалента любого металу потрібно проходження кількості електрики, яка дорівнює 26,8 А·год. Таким чином, при протіканні 1 А·год відповідно закону Фарадея виділяється: $1:26,8=0,0373$ (г-екв) (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Розрахунок кількості різних металів, які виділяються 1 А·год

Метал, що виділяється	Іон	Грам-еквівалент (атомна маса/валентність)	Кількість металу (г), яка виділяється 1 А·год (0,0373 екв. маси)
Мідь	Cu^{2+}	$63,57:2=31,78$	1,186
Нікель	Ni^{2+}	$58,69:2=29,34$	1,094
Залізо	Fe^{2+}	$55,84:2=27,92$	1,042
Золото	Au^{+}	$197,20:1=197,20$	7,357
Срібло	Ag^{+}	$107,88:1=107,88$	4,025

При користуванні таблицею 5.1 з метою визначення кількості металу, що виділиться при визначеній силі струму за певний проміжок часу, потрібно помножити величину, яка знаходиться в останній колонці, на силу струму в амперах і на час електролізу у годинах.

Так, наприклад, при визначенні кількості міді, яка виділиться на катоді при силі струму 8 А за 3 години електролізу, необхідно перемножити числа: $1,186 \cdot 8 \cdot 3=28,464$ г.

Таким чином, при постійному процесі електролізу маса металу, який буде виділений, залежить від сили струму. Сила струму, віднесена до одиниці поверхні електроду, називається густиною струму та вимірюється в амперах на квадратний дециметр (А/дм²).

У зв'язку з тим, що густина електролітичної міді становить $8,9 \text{ г/см}^3$, у зазначеному прикладі буде виділено $28,464 : 8,9 = 3,18 \text{ г/см}^3$. Якщо поділити це число на площу поверхні виробу отримаємо товщину нанесеного шару міді. Наприклад, якщо площа дорівнює $1 \text{ дм}^2 (100 \text{ см}^2)$, то товщина шару міді становить $0,31 \text{ мм}$.

Контрольні запитання

1. У чому суть гальванічного методу нанесення покриттів?
2. Які електроліти застосовують?
3. З яких металів отримують покриття і для чого їх застосовують?

Обладнання, інструменти, матеріали

1. Джерело живлення постійного струму.
2. Амперметр для вимірювання сили постійного струму на $10 \dots 20 \text{ А}$.
3. Вольтметр для вимірювання напруги постійного струму на $6 \dots 10 \text{ В}$.
4. Реостат для регулювання сили струму.
5. Ванна з електролітом.
6. Катод.
7. Анод мідний.
8. Зразки у вигляді пластин з вуглецевої сталі.
9. Штангенциркуль.
10. Лабораторні електронні ваги.
11. Калькулятор.

Вказівки з техніки безпеки

1. Виконання робіт дозволяється тільки під наглядом викладача або учбового майстра.
2. Всі роботи виконувати в захисному спеціальному одязі та взутті.
3. Обличчя повинно бути захищено спеціальною маскою, а руки – гумовими печатками.

4. При приготуванні електроліту сірчану кислоту необхідно додавати дуже повільно, тонким струменем, щоб запобігти швидкому розігріву електроліту та розбризкуванню, яке може викликати важкі опіки.

5. При потраплянні електроліту або іншої активної рідини на незахищені ділянки шкіри або тіла, негайно змити все великою кількістю води.

6. Не допускається відволікання співробітників, які займаються проведенням робіт.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Під керівництвом викладача або навчального майстра приготувати розчин наступного складу: на 1 л електроліту 150...180 г $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + 30 г H_2SO_4 .

2. Поверхні зразків очистити шліфуванням і знежирити.

3. Зразки зважити з точністю $\pm 0,01$ г та промаркувати.

4. Помістити зразок у ванну з електролітом при температурі 18...25 °С.

5. Дослідити вплив величини струму на якість покриття, його товщину та міцність зчеплення з основою за кутом загину зразка до початку відшаровування покриття.

Дослідження виконувати на окремих зразках, на які нанесено покриття при силі струму 5, 10 та 15 А за 20 хвилин роботи установки.

6. Після вилучення зразків з ванни їх промити проточною водою та висушити, а потім кожен зважити з точністю $\pm 0,01$ г.

7. Виміряти кут загину зразків з різною товщиною шару міді, при якому покриття починає відшаровуватися. Всі отримані у ході виконання роботи дані занести до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати вимірювання та досліджень

№ зразку	Сила струму, А	Маса зразка, г		Площа покриття, см ²	Товщина покриття, мкм	Кут за-гину, град
		до-	після			
1	20 мА					
2	40 мА					
3	2А					

Примітка. Час надходження у ванні 10 хв.

Зміст звіту

1. Коротко описати процеси нанесення гальванічних покриттів. Визначити їх призначення.
2. Навести схему установки для нанесення гальванічних покриттів.
3. Надати заповнену таблицю з результатами вимірювань та досліджень, а також необхідні розрахунки.
4. Зробити висновки щодо впливу режимів нанесення покриттів на їх якість та властивості.

Література

1. Жаркий И.М. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин: учеб. пособие / И.М. Жаркий, И.Л. Баршай, Н.А. Свидинович, Н.В. Спиридонов. – Минск: Выш. шк., 2010. – 336с. ISBN 978-985-06-1833-7.
2. Ведь М.В. Каталітичні та захисні покриття сплавами і складними оксидами: електрохімічний синтез, прогнозування властивостей: Монографія / М.В. Ведь, М.Д. Сахненко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – 272с.
3. Неверов А.С. Коррозия и защита материалов: учеб. пособие / А.С. Неверов, Д.А. Родченко, М.И. Цырлин. – Минск: Выш. шк., 2007. – 222с. ISBN 978-985-06-1236-6.
4. Корж В.М. Нанесення покриття: Навч. посібник / В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко; за ред. К.А. Ющенка. – К.: Арістей, 2005. – 204 с.
5. Сахненко М.Д. Основи теорії корозії та захисту металів / М.Д. Сахненко, М.В. Ведь, Т.П. Ярошок. – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – 240с.

6. Дубовий О.М. Збірник лабораторних робіт з дисципліни «Фізико-хімічні основи створення покриттів» і «Технологія нанесення покриттів» / О.М. Дубовий, Н.Ю. Лебедєва, С.М. Шумов – Миколаїв: НУК, 2004. – 76с.

7. Збожна О.М. Основи технології: Навчальний посібник / О.М. Збожна. – Тернопіль: Карт-бланш, 2002. – 486с.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ильющенко А.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый, Г.Ф. Громыко. – Минск: Беларуская навука, 2011. – 357 с.
2. Витязь П.А. Основы нанесения износостойких, коррозионностойких и теплозащитных покрытий / П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов. – Минск: Беларуская навука, 2006. – 363 с.
3. Похмурський В.І. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгунік, Г.В. Похмурська, І.Й. Сидорак. – Львів: Національна академія наук України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 2005. – 192 + вклейка 8 с.
4. Дубовий О.М. Технологія напилення покриттів: Підручник / О.М. Дубовий, А.М. Степанчук. – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.
5. Вансовская К.М. Металлические покрытия, нанесенные химическим способом / К.М. Вансовская; под ред. П.М. Вячеславова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 103 с.
6. Вансовская К.М. Промышленная гальванопластика / К.М. Вансовская, Г.А. Волянюк; под ред. П.М. Вячеславова. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1986. – 105 с.
7. Соснин Н.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – М.: Машиностроение, 2008. – 406 с.
8. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М.Д. Никитин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1985. – 199 с.
9. Корж В.М. Нанесення покриття: Навч. посібник / В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко; за ред. К.А. Ющенка. – К.: Арістей, 2005. – 204 с.
10. Петров С.В. Плазменное газовоздушное напыление / С.В. Петров, И.Н. Карп. – К.: Наук. думка, 1993. – 494 с.
11. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / Под ред. Б.С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
12. Хасуй А. Наплавка и напыление / А. Хасуй, О. Моричаки; пер. с яп. В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.