

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт
з дисципліни "Фізико-хімічні основи створення покриттів"
для студентів спеціальності 132 – "Матеріалознавство"
за освітньою програмою (спеціалізацією)
"Композиційні та порошкові матеріали, покриття"
денної форми навчання

2024

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Фізико-хімічні основи створення покриттів" для студентів спеціальності 132 – "Матеріалознавство" за освітньою програмою (спеціалізацією) "Композиційні та порошкові матеріали, покриття" денної форми навчання / Укл.: О.А. Мітяєв, В.М. Повзло. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 51 с.

Укладачі: О.А. Мітяєв, професор, д.т.н.
В.М. Повзло, ст. викладач

Рецензент: І.В. Акімов, доцент, к.т.н.

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

Затверджено
на засіданні
НМК ФБАД
Протокол № 1
від «30» серпня 2024 р.

Затверджено
на засіданні кафедри
"Композиційні матеріали, хімія
та технології"
Протокол № 1
від «06» серпня 2024 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота № 1. Визначення міцності зчеплення покриття з матеріалом основи.....	5
Лабораторна робота № 2. Вивчення особливостей структури покриттів, які отримано способами напилення, наплавлення та оплавлення.....	10
Лабораторна робота № 3. Оксидування сталі.....	23
Лабораторна робота № 4. Нанесення захисних і декоративних покриттів гальванічним методом.....	28
Лабораторна робота № 5. Основи нанесення газополумєневих покриттів.....	37
Лабораторна робота № 6. Металеві покриття, що наносяться з розплаву.....	45
Рекомендована література.....	51

ВСТУП

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Фізико-хімічні основи створення покриттів» для студентів спеціальності 132 – «Матеріалознавство» за освітньою програмою «Композиційні та порошкові матеріали, покриття» спрямовані на підготовку фахівців, здатних ефективно виконувати професійну діяльність, та набуття ними компетентностей, що дозволяють вирішувати складні спеціалізовані та практичні задачі.

Матеріали, що наведено у методичних вказівках, не є науковою працею, а являє 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

ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ЗЧЕПЛЕННЯ ПОКРИТТЯ З МАТЕРІАЛОМ ОСНОВИ

Мета роботи

Ознайомитися та опанувати методику визначення адгезійної міцності покриттів, які нанесено різними способами.

Загальні відомості

Загальні відомості до даної лабораторної роботи містять матеріали, що викладено в джерелах [1 - 13].

Важливим параметром, який визначає надійність і термін роботи деталей або виробів з покриттями, є міцність зчеплення (адгезія) робочого шару покриття з матеріалом основи, що забезпечує здатність отриманого з'єднання зберігати цілісність.

Адгезія або міцність зчеплення – це утворення зв'язків між поверхневими шарами двох різних твердих або рідких тіл (фаз), які приведено і знаходяться у контакті.

Фізичне трактування: адгезія характеризується силою, яку необхідно прикласти для розділення поверхонь або питомою роботою адгезійного відриву. Кількісно міцнісні властивості з'єднання оцінюються за його супротивом руйнуванню під дією зовнішніх зусиль. Одиниці виміру адгезійних властивостей – МПа.

Покриття для захисту поверхонь повинні мати певну щільність, міцність зчеплення з основним металом, зносостійкість, корозійну стійкість та інші властивості у відповідності з призначенням.

Відомо багато методів визначення міцності зчеплення покриттів з основою. Принципові схеми деяких з них наведені на рисунку 1.1. Серед них найчастіше використовується метод відриву конічного штифта (див. рис. 1.1 а). Цей метод придатний для оцінки міцності покриттів і при високих температурах. Якісну характеристику дає згинання плоского зразка з напиленим покриттям (див. рис. 1.1 б). За кутом згинання, при якому в покритті виникає тріщина, оцінюється його міцність. Методом відриву склеєних зразків (див. рис. 1.1 в), на один з яких нанесено покриття, визначають міцність покриттів невисокої щільності при кімнатних температурах.

Міцність зчеплення покриття з основним металом є найважливішою характеристикою. У разі використання штіфтової методики, вона визначається за формулою:

$$\sigma_{зч} = P / F = 4 P / (\pi D^2), \text{ МПа} \quad (1.1)$$

де P – зусилля відриву напиленого шару, Н;

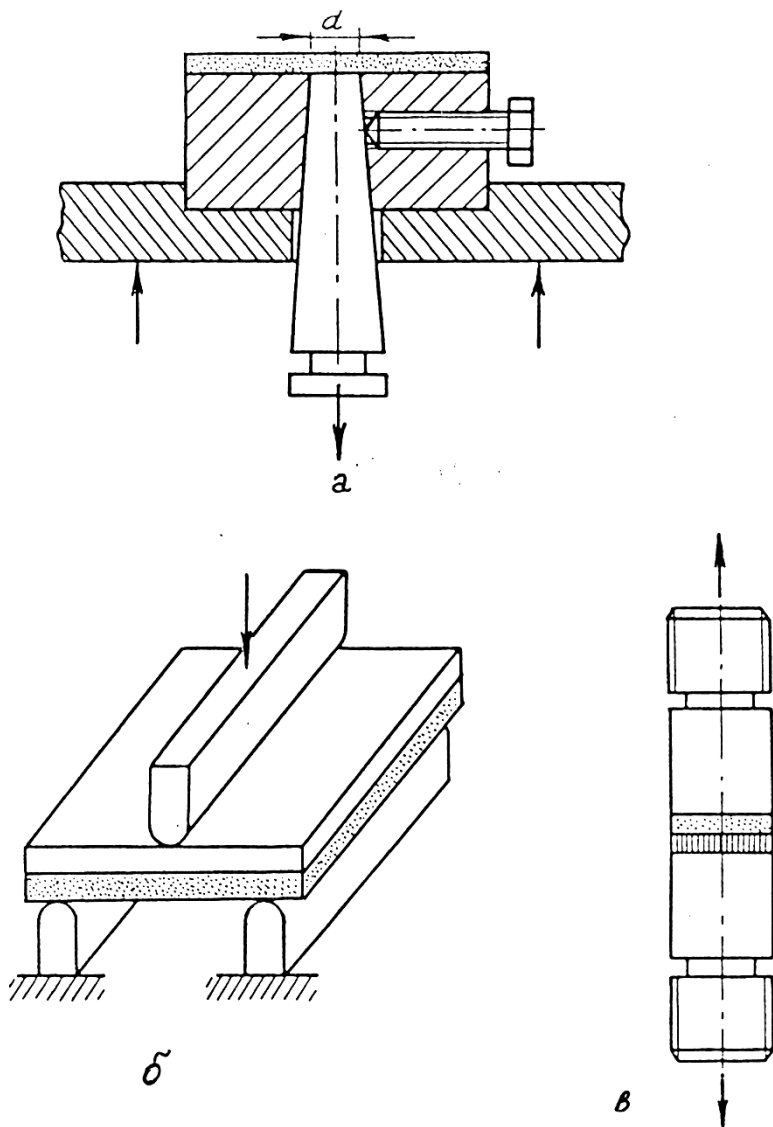
F – площа відриву, м²;

D – діаметр штіфта, м.

Міцність напилених металевих покриттів не перевищує, як правило 60 МПа, що на порядок нижче міцності основного металу. Основними чинниками низької міцності є неповне зчеплення часток з основним матеріалом, утворення макро- та мікродефектів на лінії зчеплення, знижена щільність покриттів (80...90%) у порівнянні зі щільністю основного металу; залишкові напруження, що виникають у напиленому шарі в процесі формування.

Окремий випадок адгезії – когезія – взаємодія однакових тіл, які контактують поверхнями, тобто зчеплення усередині однорідного матеріала. У деяких випадках адгезія може бути сильнішою за когезію, у таких випадках при прикладенні розривного зусилля відбувається когезійний відрив, тобто розривання в об'ємі менш міцного матеріала.

Постійне зменшення характерних розмірів електронних і мікро-наноелектромеханічних систем, покриттів у вигляді плівок і інших продуктів нанотехнологій зробило актуальним розроблення методів дослідження їх фізико-механічних властивостей (твердість, модуль Юнга, зносостійкість, величина адгезії плівок) в нанощкалі. Лідером таких випробувань є наноіндентування. Цей метод придатний для вирішення різних фізичних задач і з'ясування фундаментальних залежностей поведінки нанометрових поверхневих шарів, а також субмікронних об'ємів різних матеріалів. При дослідженні адгезії плівок використовують наноіндентори у формі конуса або у вигляді довгого тонкого леза. До індентора прикладають нормальне навантаження і одночасно переміщують його вздовж поверхні плівки (дряпання або шкрябання).



а – витягування конічного штифта, б – згинання плоского зразка,
 в – відривання зклесних зразків;

Рисунок 1.1 – Принципові схеми основних методів визначення міцності зчеплення напилених покриттів з основним металом.

Величину адгезії виражають у вигляді питомої роботи розшарування G плівки від основи. Для визначення адгезії використовується формула:

$$G = \frac{(Fr)^2 h}{\pi r^4 E}, \quad \text{Дж/м}^2 \quad (1.2)$$

де Fr – критична горизонтальна сила початку відрива плівки від основи;

h – товщина плівки;

r – радіус подряпини у мить початку розшарування;

E – модуль Юнга.

Метод дряпання дає можливість заміни макровипробувань руйнуванням на разових зразках, на випробування без руйнування.

Порядок виконання лабораторної роботи

За допомогою штифтового методу визначення міцності зчеплення покриття з матеріалом основи отримати кількісні показники адгезійних властивостей покриттів, які нанесено електродуговою металізацією і електродуговим наплавленням. Для цього:

– разом з майстром виробничого навчання нанести на підготовані зразки покриття електродуговим наплавленням, електродуговою металізацією;

– ознайомитись з принципом роботи розривної машини УММ-20 та за її допомогою визначити зусилля відриву P покриття від основного металу (за штифтовою методикою);

– за формулою (1.1) визначити адгезійну міцність шарів, які нанесено різними методами;

– вихідні дані та результати розрахунків навести у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати випробувань на міцність зчеплення

Матеріал покриття	Технологія нанесення	Зусилля відриву покриття від основи P, H	Площа відриву (штифта) $F, м^2$	Міцність зчеплення покриття з основою $\sigma_{зч}, МПа$

Зміст звіту

1. Коротко описати методи визначення адгезійних властивостей.
2. Навести схеми основних методів визначення міцності зчеплення нанесених шарів з матеріалом основи.
3. Навести таблицю з результатами проведених експериментів.
4. За результатами експериментів зробити висновок, щодо адгезійних властивостей покриттів нанесених різними способами.

Контрольні запитання

1. Що таке адгезія?
2. Як кількісно оцінюються адгезійні властивості?
3. Які методи визначення міцності зчеплення покриттів з основою Вам відомі?
4. У яких одиницях вимірюється міцність зчеплення?
5. Наведіть формулу розрахунку міцності зчеплення покриття з основою.
6. Які фактори впливають на адгезійні властивості?
7. Що таке когезія?

Обладнання, матеріали, інструмент

1. Зразки для нанесення покриттів.
2. Пост електродугового наплавлення.
3. Пост електродугової металізації.
4. Розривна машина УММ-20.
5. Штангенциркуль.
6. Калькулятор.

Вказівки з техніки безпеки

1. Перед початком нанесення покриттів електродуговими способами упевнитися в якісній ізоляції струмопровідних частин зварювальної апаратури.
2. Перед початком процесу нанесення покриттів ввімкнути витяжну вентиляцію.

3. При роботі стояти на гумовому ізолювальному килимку, у спеціальному одязі та взутті, які захищають від металевих бризок і теплового випромінювання.

4. Спостерігати за процесом нанесення покриттів допускається лише через спеціальні світлофільтри, використовуючи зварювальні щитки, маски або шоломи.

5. Встановлювати зразки для визначення адгезійних властивостей покриття у затискачі розривної машини тільки при вимкненому механізмі розтягу.

6. Під час випробування не допускається торкатися руками рухомих частин розривної машини.

Лабораторна робота № 2

ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРИ ПОКРИТТІВ, ЯКІ ОТРИМАНО СПОСОБАМИ НАПИЛЕННЯ, НАПЛАВЛЕННЯ ТА ОПЛАВЛЕННЯ

Мета роботи

Набути навичок аналізу макроструктури покриттів та оцінювання їх якості; вивчити мікроструктуру покриттів, що отримано методами напилення, наплавлення та лазерного оброблення; проаналізувати вплив структури покриття на його якість.

Загальні відомості

Загальні відомості до даної лабораторної роботи містять матеріали, що викладено в джерелах [1 - 13].

Процеси напилення та наплавлення покриттів дуже широко застосовуються у промисловості. Напилення принципово відрізняється від процесу наплавлення покриттів відсутністю оплавлення поверхні основного матеріалу деталі. Найбільш широке використання отримали електротермічна і газополуменева технології нанесення покриттів, а також лазерна технологія оброблення поверхонь.

Процеси електротермічного наплавлення мають наступні переваги:

- можливість нанесення металевого покриття великої товщини, що дуже ефективно при відновленні деталей з великою величиною зносу;
- висока продуктивність (до 25 кг/год);
- відносна простота конструкції і транспортабельність обладнання;
- відсутність обмежень на розміри поверхонь виробів, які наплавляють;
- простота виконання, що не потребує високої кваліфікації зварювальника;
- можливість нанесення зносостійкого покриття на основний метал любого складу;
- підвищення ефективності наплавлення у поєднанні з іншими способами поверхневого оброблення;
- обмеження або повне виключення витрат дефіцитних газів (C_2H_2 , He, Ar).

Технологія електротермічного наплавлення має наступні недоліки:

- зміна або погіршення властивостей напавленого шару за рахунок потрапляння елементів основного металу;
- нерівномірність властивостей напавленого шару;
- деформація виробу, яка обумовлена високою питомою енергією наплавлення;
- труднощі наплавлення дрібних виробів складної форми.

Електротермічна технологія напилення забезпечує наступні переваги:

- можливість нанесення покриттів на вироби з любого матеріалу (метал, скло, фарфор, деревина, папір);
- відсутність обмежень за розміром виробів, які напилюють;
- можливість нанесення покриттів товщиною більш 1 мм, що дозволяє застосовувати цю технологію для відновлення деталей;
- широкий вибір матеріалів для напилення, а також можливість нанесення багатшарових покриттів;
- невелике деформування виробів під впливом напилення;
- простота технологічних операцій, відносно невелика трудоміскість, висока продуктивність нанесення захисного покриття;

– нескладна конструкція обладнання, мала маса та габарити, зручність в експлуатації.

Недоліки електротермічної технології напилення:

– невисока ефективність нанесення покриттів на дрібні деталі через низький коефіцієнт використання матеріалу, який наноситься (відношення маси покриття до загальної маси витраченого матеріалу);

– виділення значної кількості диму та аерозолів (дрібних часток матеріалу, який напилюється у поєднанні з повітрям або сумішами газів). Необхідність використання потужних вентиляційних систем.

До електротермічної технології напилення відносяться електродугове та плазмове напилення. При електродуговому напиленні енергія дуги використовується на розплавлення дроту. Розплавлений метал підхоплюється струменем стиснутого повітря, яке витікає із центрального сопла електрометалізатора, і у дрібнорозплавленому вигляді переноситься на поверхню основного матеріалу. Розпилення та транспортування розплавленого металу здійснюється повітрям, хоча при напилюванні корозійностійких сталей і алюмінієвих сплавів використовують азот.

Плазмове напилення – це процес нанесення покриттів нагріванням і розплавленням матеріалу, що напилюється в плазмовому струмені, з наступним осадженням часток на основному металі без його розплавлення. Нагрівання та перенос напилюваного матеріалу проходить у потоці низькотемпературної плазми ($T \approx 10000 \text{ K}$). Матеріал для напилення використовується у вигляді дроту, або, частіше, порошку. Покриття можливо наносити на будь які матеріали практично без змін їх властивостей тому, що поверхні виробів нагріваються до температур, що не перевищують $70...300^\circ\text{C}$.

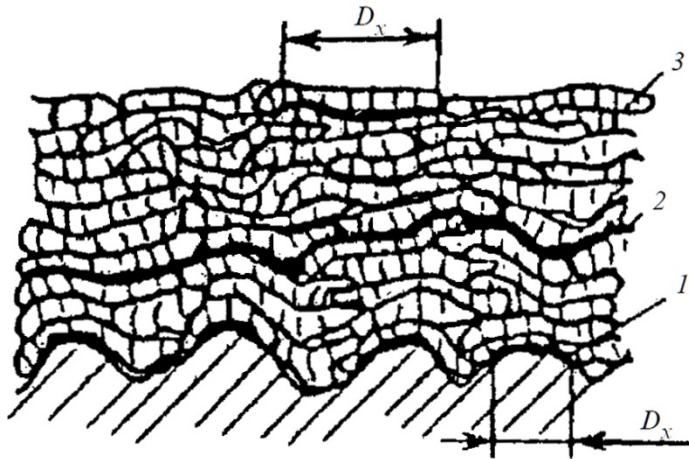
Плазмове покриття є своєрідним матеріалом, отриманим у результаті удару, деформації та надзвичайно швидкої кристалізації невеликих ($5...100 \text{ мкм}$) часток матеріалу, напиленого на підкладку. Послідовно накладаючись одна на одну, частки утворюють лускате покриття з анізотропією фізичних і механічних властивостей, неоднорідне в структурному та хімічному відношенні. Таке покриття характеризується розвиненою поверхнею меж між частками і підвищеним вмістом оксидних включень, особливо на межах окремих шарів. Закінчену структуру та властивості покриття визначають конкретні процеси при ударі, деформації, твердінні й охолодженні

часток, а також процеси їхньої фізико-хімічної взаємодії з плазмоутворювальними газами й навколишнім середовищем.

Схематично структуру напилених покриттів зображено на рисунку 2.1.

Газополуменева технологія характеризується наступними перевагами:

- незначне проплавлення основного металу;
- можливість наплавлення дрібних виробів складної форми;
- зниження небезпеки утворення тріщин, оскільки процес наплавлення включає попередній підігрів і наступне повільне охолодження виробу;
- низька вартість обладнання, його компактність і мобільність.



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 2.1 - Схема структури покриттів [7].

Недоліки газополуменевої технології наплавлення та напилення:

- низька продуктивність при нанесенні покриттів на масивні деталі через необхідність попереднього підігріву;
- висока кваліфікація зварювальника.

При газополуменевій технології як джерело енергії для нагрівання, плавлення та прискорення частинок матеріалу, який утворює покриття, найчастіше використовується енергія горіння газів і пари рідких палив у суміші з киснем або повітрям. 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 шт/с·см². Цей метод не забезпечує можливість нанесення тугоплавких матеріалів. Газополуменеві покриття мають відкриту пористість до 10...15%, а міцність зчеплення з основою близько 30 МПа.

Міцність напилених на повітрі металевих покриттів не перевищує 10...60 МПа, що на порядок нижче міцності металів. Основні причини низької міцності покриттів:

- сумарна площа всіх ділянок між частками, на яких утворилося міцне з'єднання, складає тільки частину всієї площі їхнього контакту;
- міцність у місці приварювання нижча від міцності компактного матеріалу, що пояснюється макро- і мікроскопічною дефектністю утвореного з'єднання та невеликим взаємним проникненням матеріалів підкладки та покриття внаслідок малих об'ємних взаємодій та спряження кристалічних ґраток з різним видом хімічного зв'язку, наприклад покриття з оксиду на металі;
- велике залишкове напруження, що виникає у напиленому матеріалі в процесі формування покриття;
- знижена густина покриттів (85...93%) у порівнянні з густиною компактного матеріалу.

Густина і пористість – основні характеристики покриття, за якими можна судити про якість напиленого матеріалу покриття. Загальноприйнятий спосіб визначення густини та пористості покриттів – гідростатичне зважування.

Лазерна технологія отримання захисних покриттів відноситься до локальних методів оброблення поверхонь виробів за допомогою висококонцентрованих джерел нагрівання.

Лазерний промінь, як джерело нагрівання, має певні особливості та переваги:

- висока концентрація підведеної енергії та її локальність дії дозволяють обробляти тільки поверхневу ділянку матеріалу без

нагрівання решти об'єму та порушення його структури і властивостей, що призводить до мінімального деформування виробів;

- висока концентрація енергії дозволяє нагрівати та охолоджувати об'єм матеріалу, що оброблюється, з великими швидкостями при малому часі впливу. В результаті цього можна отримати унікальні структури та властивості обробленої поверхні;

- можливість регулювання параметрів лазерної обробки у широкому інтервалі режимів дозволяє регулювати та управляти структурою та властивостями поверхневих шарів (твердість, зносостійкість, шорсткість);

- відсутність дії механічних зусиль на матеріал дозволяє обробляти крихкі та ажурні конструкції;

- можливість оброблення на повітрі, легкість автоматизації процесів, відсутність шкідливих викидів і відходів при обробленні визначають високу технологічність лазерного променя;

- можливість оброблення важкодоступних місць за рахунок здатності транспортування лазерного випромінювання за допомогою спеціальних оптичних систем.

Недоліки лазерної технології отримання захисних покриттів:

- висока вартість обладнання (лазерної установки у комплекті з системою механічного та оптичного оснащення, з автоматичним керуванням переміщення лазерного проміню або деталі);

- лазерне гартування відрізняється низькою продуктивністю, малою глибиною оброблення (300 мкм при потужності установки 1,5...2,0 кВт), нерівномірною поверхневою твердістю (періодичною зміною зон гартування та відпуску).

Дослідження впливу лазерного оброблення на формування покриття проводили на двох зразках з алюмінієвого сплаву АК8МЗ [6]. Перший зразок був виготовлений з первинного сплаву, а другий – з вторинного. Хімічний склад обох сплавів наведено у таблиці 2.1, а вихідна структура на рисунку 2.2.

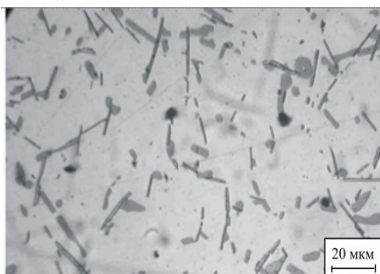
Металографічний аналіз показав, що сплав на основі первинної сировини мав більш дисперсну структуру та достатньо рівномірний розподіл фаз (див. рис. 2.1). Залізовмісна фаза в ньому мала розміри 5...20 мкм, також в сплаві спостерігалися поодинокі дефекти у вигляді мікропор. В той же час підвищений вміст домішок і, зокрема, заліза у вторинному сплаві призвів до утворення грубої структури і крупних пластинчастих включень фази Al_2Fe довжиною більше 200 мкм,

підвищеної кількості пор, які розташовувалися не тільки в тілі матриці, а й на границі розділу «матриця-інтерметалід» (див. рис. 2.2; рис. 2.3).

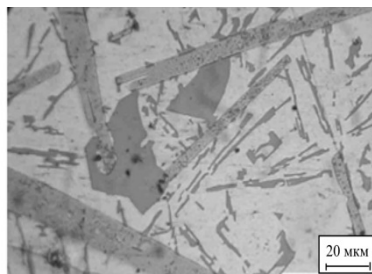
Лазерну обробку поверхонь зразків проводили на імпульсному лазері «КВАНТ-12» на повітрі (час дії імпульсу $\tau=4$ мс, довжина хвилі $\lambda=0,6943$ мкм) з 30% перекриттям доріжок. Для підвищення поглинальної здатності поверхню зразків покривали шаром сажі. Лазерну обробку проводили при густині потужності випромінювання $q \sim 600$ МВт/м².

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплавів АК8МЗ [6].

Сплав	Вміст елементів, мас. %														
	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Zn	Ni	Pb	Sn	Ti	Cr	Sb	Ca	V	Al
первинний	8,20	2,56	0,31	0,04	0,03	0,045	0,01	0,0035	0,002	0,0115	0,009	0,012	0,001	0,001	залиш.
вторинний	9,82	3,10	1,57	0,40	0,32	0,76	0,044	0,144	0,0267	0,040	0,023	0,082	0,0106	0,0055	залиш.



а



б

а – первинний; б – вторинний;

Рисунок 2.2 – Вихідна структура сплавів [6].

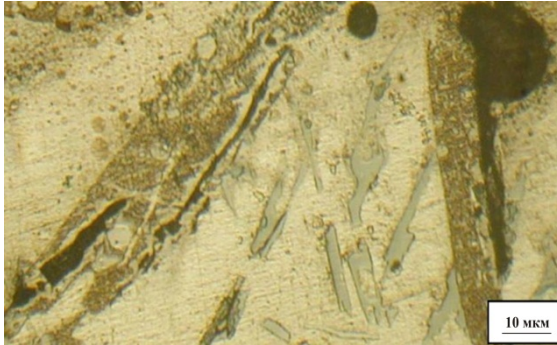
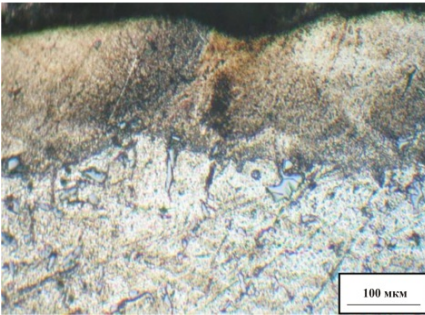
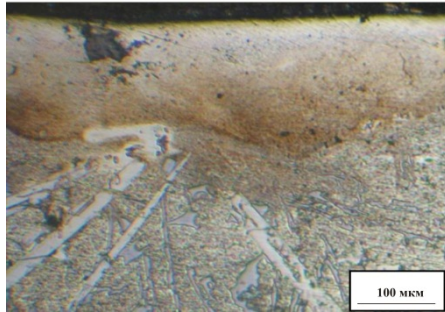


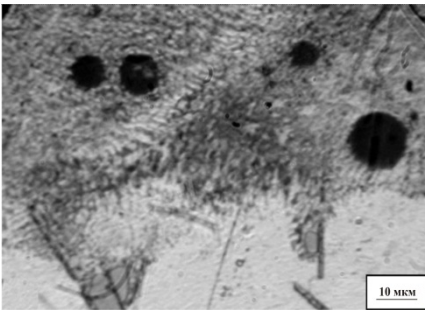
Рисунок 2.3 – Дефекти у вторинному сплаві [6].



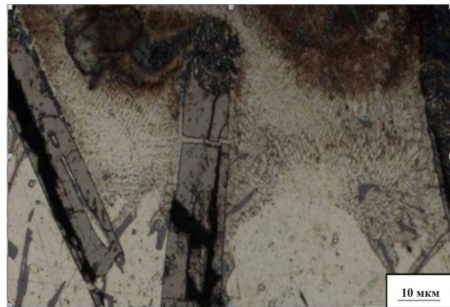
а



б



в



г

а, б – зона лазерної дії; в, г – зона термічного впливу;

Рисунок 2.4 – Структура первинного (а,в) та вторинного (б, г) сплавів після однократної лазерної обробки [6].

Після оброблення лазером поверхні зразка з первинного сплаву зона лазерної дії (ЗЛД) складалася з зони гартування з рідкого стану

(ЗГРС) глибиною до 150 мкм та зони термічного впливу (ЗТВ) глибиною до 50 мкм (рис. 2.4 а,в).

Відносно невисока густина потужності випромінювання ($q \sim 600 \text{ МВт/м}^2$) призвела до часткового розчинення інтерметалідних фаз та неповного перемішування розплаву в ЗГРС. Все це призвело до формування в місцях розташування інтерметалідних фаз і кремнію зон збагачених легувальними елементами. В результаті виникнення у зоні розплаву турбулентних потоків проходило перемішування, що сприяло отриманню шару металу з дуже дрібнодисперсною (тонкою) структурою. Середні значення мікротвердості шару покриття склали $\sim 1300 \pm 100 \text{ МПа}$, у той час, як у необробленого сплаву, мікротвердість основи (α -твердий розчин кремнію в алюмінії) становила 1065 МПа, інтерметалідних фаз (Al_2Fe) – 4830 МПа, а включень на основі кремнію – 9000...11000 МПа. Структура ЗТВ складалася з сукупності не до кінця розчинених інтерметалідних фаз, евтектичного кремнію у α -твердому розчині кремнію в алюмінії.

При лазерній обробці вторинного сплаву переважно утворювалася тільки одна зона – зона гартування з рідкого стану (ЗГРС), можливо внаслідок того, що температура в зоні лазерної дії була недостатньою для повного розплавлення грубої залізовмісної фази (див. рис. 2.4 б). При цьому, якщо крупні інтерметаліди розташовувалися паралельно поверхні, то вони могли бути причиною зростання теплового опору між зоною обробки та матрицею, що призводило до зменшення глибини оплавленого шару (див. рис. 2.4 б, рис. 2.5).

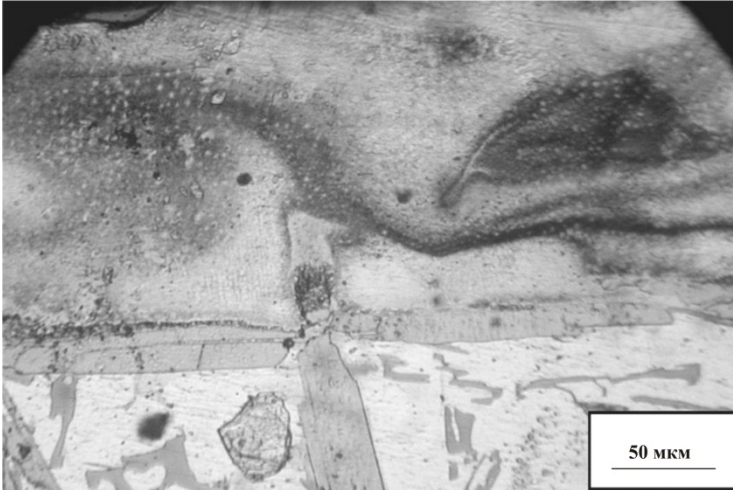


Рисунок 2.5 – Інтерметалідна залізовмісна фаза на границі «оплавлений шар – матриця» [6].

При відсутності крупних інтерметалідів поблизу зони розподілу «оплавлений шар – матриця» була присутня також зона термічного впливу. В ній формувалася структура з евтектичними колоніями, збагаченими кремнієм та легувальними елементами при частковому розчиненні та подрібненні інтерметалідних включень (див. рис. 2.4 г). Глибина оплавленого шару вторинного силуміну була біля 200 мкм, а середнє значення мікротвердості дорівнювало 2400 МПа. Більш високі значення твердості в ЗЛД вторинного силуміну можна пояснити більш високим вмістом заліза, марганцю, магнію та інших елементів, які входили до складу сплаву (див. табл. 2.1). Їх підвищений вміст відповідно сприяв збільшенню об'ємної долі інтерметалідних включень, зокрема залізовмісної фази, як в усьому сплаві, так і в оплавленому шарі. Під дією лазерного випромінювання відбувалося часткове розчинення та подрібнення інтерметалідів, тобто виникав ефект легування в зоні розплаву, завдяки якому мікротвердість оплавленої зони вторинного силуміну була вище первинного в середньому на 1000 МПа. До істотних недоліків сплаву зі вторинної сировини можна віднести утворення магістральних тріщин. Висока пористість сплаву сприяла виникненню, розгалуженню та проходженню вздовж крупних залізовмісних

інтерметалідів тріщин, що починалися в ЗЛД (рис. 2.6). В первинному сплаві залізовмісні включення були досить дисперсними і поодинокі тріщини не носили вираженого магістрального характеру.

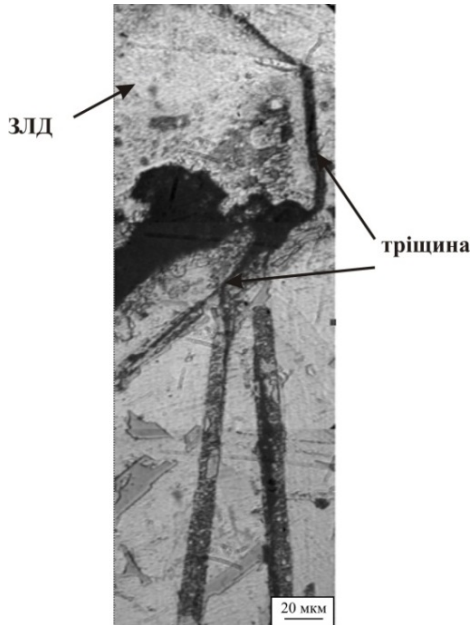


Рисунок 2.6 – Розповсюдження тріщини у вторинному сплаві [6].

Правила приймання покриттів

Деталі з покриттями оглядають неозброєним оком при освітленні розсіяним світлом. На покритті не допускаються не покриті ділянки поверхні, відшаровування, утворення пухирів або набряків, висока шорсткість, губчасті осадження. Покриття повинні бути світлими, гладкими та блискучими, якщо вони отримані в електролітах з блискоутворювальними добавками. Пасивовані цинкові та кадмієві покриття не повинні мати темно-коричневого кольору.

Окремі дефекти покриття відповідно з вимогами ГОСТ 9.301-78 допускаються у обмеженій кількості. До них належать: сліди від підвісних приспособ, сліди від стикання (наприклад, води), відсутність покриття на важкодоступних ділянках поверхні деталей (внутрішні порожнини трубчастих виробів, напусток зварних швів, шпарин лиття

або паяння). Допускаються незначні пошкодження на анодних покриттях (Zn, Cd) у вигляді дуже дрібних неглибоких подряпин.

Міцність зчеплення (ГОСТ 9.302-79) перевіряють нанесенням сітки подряпин за допомогою спеціального індентора. Покриття вважається якісним, якщо у точках перетину подряпин не відбувається відшаровування у вигляді дрібних лусочок металу. Для листових матеріалів міцність зчеплення визначається вигином під кутом 90° в обидві сторони. Згинання проводять поки не відбудеться злам. Покриття вважається якісним, якщо у місці зламу не відбувається відшаровування.

Для дротів діаметром до 2 мм міцність зчеплення покриття перевіряють навиванням дроту на стрижень потрібного діаметра до 10...15 витків, які щільно розміщені один до одного. Покриття неповинне тріскатись або відшаровуватись.

Товщина покриття є одним з найважливіших параметрів, що визначає корозійну стійкість виробів, тому визначення товщини покриття є необхідною контрольною операцією. Контролю товщини шару покриття піддають від 1 до 3% деталей з кожної партії. Відповідно до вимог ГОСТ 9.302-79 використовують різні методи визначення товщини покриттів, як на готових виробах, так і на зразках-свідках, які присутні при нанесенні покриттів одночасно з деталями.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Підготувати шліфи з різними видами покриттів для вивчення їх будови та структури за допомогою оптичного мікроскопу.
2. Вивчити зовнішні відмінності різних видів покриттів.
3. Провести макро- та мікроаналіз шліфів і вивчити структуру покриттів отриманих різними способами, набути навичок їх класифікації.
4. Орієнтовно визначити параметри структурних складових покриттів і вивчити наявні у покриттях дефекти та причини їх виникнення.
5. Визначити товщину кожного покриття металографічним методом, а також за допомогою штангенциркуля.

6. Зробити висновок про вплив конкретних факторів на якість та структуру покриттів.

Зміст звіту

1. Описати макро- та мікроструктуру кожного з вивчених покриттів. Класифікувати їх за певними відзнаками.
2. Навести рисунки структур вивчених покриттів.
3. Зробити висновки щодо пористості, товщини, однорідності та наявності дефектів.

Вказівки з техніки безпеки

1. Перед включенням оптичних мікроскопів впевнитися у безпечності приєднувальних дротів.
2. Налаштування мікроскопів проводити під наглядом викладача або навчального майстра.

Обладнання, матеріали, інструмент

1. Оптичні мікроскопи.
2. Зразки з нанесеними електротермічними, газополумєневими та лазерним покриттями.
3. Мікрошліфи покриттів, які отримано електродуговим наплавленням, газополумєневим напилюванням та лазерним оплавленням поверхонь.
4. Штангенциркуль.

Контрольні запитання

1. Що таке покриття?
2. З якою метою проводять аналіз макро- та мікроструктури покриттів?
3. Наведіть основні переваги та недоліки електротермічної технології нанесення покриття наплавленням.
4. Охарактеризуйте будову та структуру наплавленого покриття.
5. Наведіть основні переваги та недоліки електротермічної технології напилення покриттів.

6. Охарактеризуйте будову та структуру напилених покриттів.

7. Наведіть основні переваги та недоліки газополуменевої технології нанесення покриттів.

9. В чому суть лазерної технології створення покриттів?

10. Назвіть основні переваги та недоліки лазерної технології отримання покриттів.

11. Охарактеризуйте будову та структуру лазерного покриття.

12. Які фактори суттєво впливають на якість кожного виду покриття?

13. Які фактори суттєво впливають або визначають якість покриттів кожного виду?

14. Назвіть основні характеристики покриттів за якими оцінюють якість.

Лабораторна робота № 3

ОКСИДУВАННЯ СТАЛІ

Мета роботи

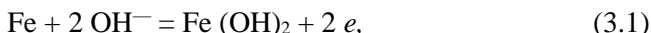
Отримання на сталі оксидного покриття лужним методом і визначення його пористості.

Загальні відомості

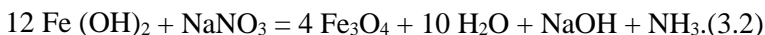
Загальні відомості до даної лабораторної роботи містять матеріали, що викладено в джерелах [1 - 13].

Оксидування чорних металів знайшло широке застосування в техніці захисту їх від атмосферної корозії. Оксидну плівку на сталі можна отримати як електрохімічним (анодним) окисленням в електролітах, так і шляхом хімічного оброблення сталі в кислих або частіше лужних окислювальних середовищах при підвищених температурах, наприклад в концентрованих розворах лугів і селітри, в розплаві нітрату натрію, а також нагрівом у атмосфері водяного пару (паротермічний метод). Найбільше розповсюдження в техніці отримали хімічні методи лужного оксидування сталі.

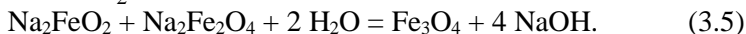
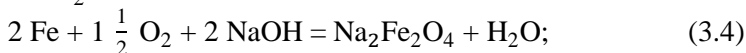
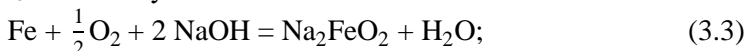
В процесі лужного оксидування в результаті взаємодії заліза з окислювачем на металі утворюється захисна плівка із оксидів заліза, переважно із магнітного оксиду Fe_3O_4 . При хімічному оксидуванні в розчинах електролітів, наприклад у лужно-нітратних ваннах, окремі стадії утворення плівок мають електрохімічний механізм. Можна допустити, що первинним процесом є реакція утворення гідрату закису заліза:



з наступним хімічним окисленням його в більш високу ступінь за реакцією:



Разом з електрохімічним окисленням не виключається паралельний чисто хімічний процес окислення заліза з утворенням магнетиту Fe_3O_4 за наступною схемою:



Оксидна плівка, яку отримано на сталі лужним методом, має блискучий чорний колір. Захисні властивості оксидних плівок на залізі та сталі незначні, тому оксидування застосовують для захисту сталі від атмосферної корозії в легких (кімнатних, цехових) умовах експлуатації. Коли разом із захистом деталі від корозії необхідно зберегти точні калібровані розміри та гарний зовнішній вигляд деталі (вимірювальний інструмент, деталі приладів, зброя та ін.), застосовують лужне оксидування.

Спосіб парового оксидування часто застосовують від корозії для ріжучого інструменту (свердл, метчиків, фрез і ін.). В цьому випадку вдається разом з підвищенням корозійної стійкості значно збільшити зносостійкість та, крім того, об'єднати процес оксидування з високотемпературним відпуском деталей, які виготовлені із швидкокоріжучих сталей. Для проведення парового оксидування

потрібне значно складніше обладнання та забезпечення високого рівня санітарно-гігієнічних вимог.

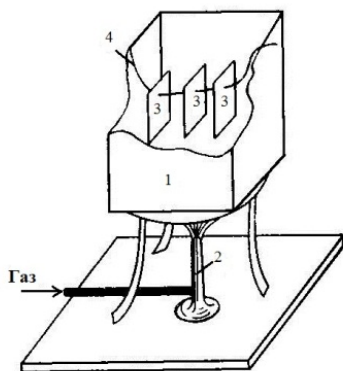
Після оксидування сталеві деталі, як правило, змащують вазеліном або покривають лаком, що забезпечує значне збільшення терміну їх служби.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Приготувати розчин для проведення оксидування (700 г NaOH, 200 г NaNO_2 і 50 г NaNO_3 на 1 л H_2O).

2. Залити розчин у металеву ванну (рис. 3.1) і нагріти зовнішнім джерелом тепла до температури кипіння, яка дорівнює $136\text{...}142^\circ\text{C}$.

3. Приготувати сталеві зразки. Для цього зачистити їх наждачним папером; обезжирити, шляхом протирання поверхні спочатку ваткою, яка змочена в органічному розчиннику, а потім за допомогою волосної щітки кашницею з суміші $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і CaCO_3 . Потім зразки підвісити на металеву підвіску, промити холодною проточною водою до повного видалення вапна. Після цього зразки злегка протравити упродовж до 0,5 хв у холодному 15% розчині HCl, промити холодною проточною водою, висушити фільтрувальним папером.



1 – ванна; 2 – газовий пальник або інше джерело тепла; 3 – сталеві зразки; 4 – сталева підвіска;

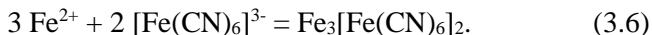
Рисунок 3.1 – Схема пристрою для лужного оксидування.

4. Підготовлені зразки швидко занурити у ванну для оксидування. В процесі оксидування сталі необхідно підтримувати температуру у ванні на заданому рівні, інакше можемо отримати плівку низької якості (нерівномірний окрас оксидованої поверхні, коричневі або зелені відтінки оксидних шарів і ін.).

5. В процесі оксидування ретельно слідкувати за часом знаходження зразків у ванні. Після закінчення визначеного терміну (для різних номерів зразків він наведений у таблиці), завершити підігрів ванни,

вийняти зразки; ретельно промити їх спочатку холодною проточною, а потім гарячою водою; висушити фільтрувальним папером.

6. Визначити пористість оксидної плівки лужного оксидування. Для цього наложити на суху поверхню оксидованого зразка фільтрувальний папір, який змочено у розчині (10 г $K_3[Fe(CN)_6]$ + 15 г NaCl + 1 л H_2O). В порах покриття при цьому утворюються крапельки турибулевої сіні за реакцією:



Потім зняти папір, зразок промити у воді і все це висушити у сушильній шафі при температурі 50...60°C.

7. Підрахувати середнє значення відбитків на 1 cm^2 поверхні фільтрувального паперу (оксидованого зразка). Отримані дані занести до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри оксидування та характеристика покриття

№№ зразка	Матеріал зразка	Температура розчину t, °C	Час оксидування τ , год	Зовнішній вигляд оксида (колір, блиск і інше)	Кількість пор на 1 cm^2

Вказівки з техніки безпеки

1. Кожен реактив, прибор, склянка і приспособа для роботи повинні мати своє постійне місце. По закінченню роботи установку необхідно привести у вихідний стан, а посуду вимити.

Забороняється залишати даже на короткий термін хімічні реактиви, різні проби, промивні води, розчини без етикеток або в місцях, для них непризначених, так як це може привести до тяжких нещасних випадків.

2. Речовини та рідини, які легко займаються (бензин, бензол, органічні розчинники та ін.), берегти від відкритого полум'я; при

роботі з ними використовувати незначну кількість цих речовин і швидко закрити склянку пробкою.

3. Роботи, які пов'язані з використанням хромового електроліта, концентрованих кислот або лугів, виконувати тільки у витяжних шафах, що обладнані спеціальною вентиляцією.

4. При переливанні розчинів користуватися воронками та не проливати рідину; посуд після використання промивати проточною водою.

5. При роботі з їдкими продуктами (кислоти, луги та розчини солей) користуватися гумовою грушею; категорично забороняється набирати розчин до піпетки за допомогою рота. Невиконання цих вимог може призвести до тяжких опіків і отруєнь.

6. Категорично заборонено визначати вкус або запах речовини, а також наближати нос до країв посудів.

7. При приготуванні розчинів кислот або їх сумішей використовувати захисні окуляри; при цьому щоб запобігти розбризкуванню важку рідину слід вливати до більш легкої (кислоту до води, H_2SO_4 до HNO_3 і ін.); змішувати гарячі кислоти або луги з гарячою водою категорично неприпустимо, так як в цьому випадку відбувається бурний викид рідини із посуду.

8. Роботи з агресивними рідинами виконувати тільки в гумових захисних перчатках. Рідину, що розлита на стіл або підлогу, швидко видаляти сухою ганчіркою, а потім ганчіркою, яка змочена у воді.

9. При хімічних опіках необхідно швидко та якісно промити уражене місце проточною водою та звернутися за кваліфікованою медичною допомогою.

10. З метою уникнення опіків заборонено брати голими руками зразки та обладнання, що не остигло.

11. Категорично заборонено працювати з електрообладнанням і приборами мокрими руками.

Зміст звіту

1. Коротко описати технологію оксидування лужним методом.
2. Навести схему установки для лужного оксидування.
3. Навести таблицю з результатами проведених експериментів.

4. За результатами експериментів зробити висновок про залежність пористості та якості покриття від параметрів технологічного процесу створення покриття.

Контрольні запитання

1. Що таке оксидування?
2. З якою метою проводиться оксидування?
3. Викладіть суть технологічного процесу створення покриття лужним методом.
4. В чому полягають переваги та недоліки методу лужного оксидування?
5. Що потрібно робити для збільшення терміну служби оксидованого покриття?

Лабораторна робота № 4

НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ І ДЕКОРАТИВНИХ ПОКРИТТІВ ГАЛЬВАНІЧНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи

Експериментально ознайомитись з технологією нанесення гальванічних захисних покриттів. Отримати практичні навички з визначення критеріїв раціонального використання електричної енергії в процесі електролізу.

Загальні відомості

Загальні відомості до даної лабораторної роботи містять матеріали, що викладено в джерелах [1 - 13].

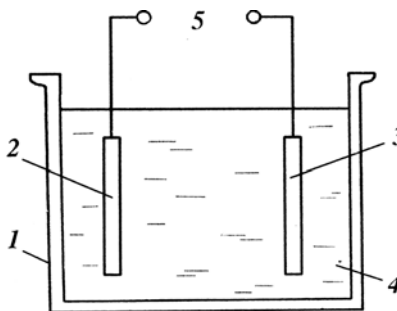
Гальванічний метод (електрохімічне осаджування) є одним з розповсюджених методів нанесення металічних захисних покриттів на металеві вироби. Суть методу полягає в тому, що метал, який захищають (деталі, конструкція), в якості катоду занурюється до ванни з розчином, який містить іони металу Me^{n+} , що наносять. Електрохімічні процеси відбуваються у агрегатах, які називають електролізерами.

Електролізер (рис.4.1) складається з ванни 1, викладеної з середини кислотостійкими матеріалами, електродів (анода 2 й катода 3), допоміжних механізмів і пристроїв. Через електроліт (розчин або розплав) 4, яким заповнюють ванну, від позитивного електрода (анода) до негативного (катода) проходить постійний електричний струм від джерела струму 5. Електроди можуть бути твердими (наприклад, виготовлені з міді, заліза, графіту тощо) та рідинними (з ртуті).

Кількість речовини, яка виділяється на електродах під час електролізу залежить від кількості електричного струму, який пройшов через електроліт. Ця залежність визначається законами Майкла Фарадея.

Перший закон: кількість речовини (m), яка виділилась на електродах, прямо пропорційна до сили струму (I) і часу (t) його проходження через електроліт.

Другий закон: при проходженні однієї кількості електрики через різні електроліти, кількість речовини, яка виділяється на електродах, прямо пропорційна до хімічних еквівалентів цих речовин.



1 – корпус ванни; 2 – анод; 3 – катод;
4 – електроліт; 5 – джерело струму;

Рисунок 4.1 – Схема електролізера.

На аноді відбуваються реакції розчинення або окислення металу, на катоді – його виділення або відновлення. Наприклад, у процесі електролізу водного розчину хлориду натрію (NaCl) на аноді виділяється хлор, а на катоді – водень; у процесі рафінування міді анод, виготовлений з чорнової міді, розчиняється, а на катоді виділяється чиста мідь. Внаслідок чого розміри анода зменшуються, а катода збільшуються. Домішки переходять до електроліту.

При пропусканні постійного електричного струму іони Me^{n+} рухаються до катоду і відновлюються на його поверхні до металу, утворюючи покриття:



Анодами звичайно бувають пластини металу, який наносять, Me^0 ; вони розчиняються в процесі електролізу:



що компенсує витрати іонів із розчину. В тих випадках, коли використовуються інертні аноди (наприклад, свинцеві при хромуванні), необхідно постійно контролювати і корегувати склад електроліту. До складу електроліту, окрім іонів металу, часто входять різні технологічні домішки:

- кислота або луг – для створення потрібного рН;
- буфер (сіль слабкої кислоти або слабкої основи, щоб підтримувати заданий рН);
- вирівнюючі добавки і блискоутворювачі (поверхнево-активні і високомолекулярні органічні сполуки) – щоб отримати рівномірне за товщиною, дрібнозернисте покриття;
- активатор (добре розчинний хлорид) – щоб запобігати пасивації анодів;
- добавки, які покращують електропровідність розчинів (солі лужних металів, які добре дисоціюють) – для зменшення втрат електрики на опір електроліту;
- модифікувальні добавки (сполуки сірки, фосфору та інші) – щоб збільшити твердість, корозійну стійкість, здатність до паяння та інші властивості покриттів.

Тому сучасний промисловий електроліт може містити від 2 до 10 речовин (іноді досить коштовних).

Крім складу електроліту, на якість покриттів суттєво впливає його температура. Підвищення температури покращує розчинність солей і електропровідність розчину, однак це погіршує умови праці персоналу гальванічної дільниці через випаровування електроліту. Підвищення щільності струму збільшує швидкість процесу, але знижує розсіювальну здатність електроліту, збільшуючи

нерівномірність та поруватість покриття. Тому рецептура електроліту завжди дотримується запропонованих параметрів процесу, перевірених роками на практиці, які забезпечують потрібну якість покриття за оптимальних технологічних умов.

Гальванічний метод дозволяє отримати рівномірні одношарові та багатшарові корозійностійкі і захисно-декоративні покриття з більшості металів (Zn, Cd, Sn, Pb, Cu, Ni, Cr, Ag, та їх сплавів), контролювати товщину та інші параметри покриттів, вести процес осадження при невисоких температурах та невеликих витратах ручної праці. Недоліками методу є досить висока енергоємність процесу і обмеженість при нанесенні покриттів на крупногабаритні конструкції.

Широке розповсюдження у машинобудуванні, на транспорті, в електротехнічній галузі та будівництві отримало нанесення, у якості захисного та декоративного, мідного покриття. Мідне покриття на сталі забезпечує в атмосферних умовах достатньо тривалий захист поверхні від корозії, гарний блискучий зовнішній вигляд і досить високий опір механічному зношуванню.

У якості приклада розглянемо технологію отримання захисного та декоративного мідного покриття.

Завдання на підготовку до лабораторної роботи

При підготовці до лабораторної роботи повторити теоретичний матеріал, що стосується суті та значення електрохімічних процесів, а також факторів, що на них впливають. Ознайомитись з галузями застосування електролізу.

Контрольні запитання

1. Які процеси називаються електрохімічними?
2. В чому полягає суть першого закону Фарадея?
3. В чому полягає суть другого закону Фарадея?
4. В чому переваги та недоліки електрохімічних процесів?
5. Що найчастіше використовується у якості електролітів?
6. В яких галузях промисловості отримали розповсюдження покриття, які нанесено за допомогою електрохімічних процесів?
7. Який устрій має електролізер і основні принципи його роботи?

Обладнання, інструменти, матеріали

1. Реактиви для приготування електролітів:
 - а) сульфат міді (із розрахунку 150...180 г/л електроліта);
 - б) сірчана кислота (із розрахунку 30 г/л електроліта).
2. Дистильована вода.
3. Мірні колби (1 л).
4. Мірний циліндр (1 л).
5. Електролізери.
6. Джерело постійного струму. Випрямляч селеновий на 4...6 В, 10...20 А, або акумулятор 4...6 В, або гальванічні батареї 4...6 В, або шкільний електророзподільчий щит (ШЭ-56).
7. Вольтметр постійного струму на 6...10 В.
8. Амперметр постійного струму 10...20 А.
9. Анод мідний. Розмір анода повинен бути не менше розмірів форми.
10. Мідні ізольовані провідники струму.
11. Наждачний та фільтрувальний папір.
12. Зразки металу.

Вказівки з техніки безпеки

1. Кожен реактив, прибор, склянка і приспособа для роботи повинні мати своє постійне місце. По закінченню роботи установку необхідно привести у вихідний стан, а посуду вимити.

Забороняється залишати даже на короткий термін хімічні реактиви, різні проби, промивні води, розчини без етикеток або в місцях, для них непризначених, так як це може привести до тяжких нещасних випадків.

2. Речовини та рідини, які легко займаються (бензин, бензол, органічні розчинники та ін.), берегти від відкритого полум'я; при роботі з ними використовувати незначну кількість цих речовин і швидко закривати склянку пробкою.

3. Роботи, які пов'язані з використанням хромового електроліта, концентрованих кислот або лугів, виконувати тільки у витяжних шафах, що обладнані спеціальною вентиляцією.

4. При переливанні розчинів користуватися воронками та не проливати рідину; посуд після використання промивати проточною водою.

5. При роботі з їдкими продуктами (кислоти, луги та розчини солей) користуватися гумовою грушею; категорично забороняється набирати розчин до піпетки за допомогою рота. Невиконання цих вимог може призвести до тяжких опіків і отруень.

6. Категорично заборонено визначати вкус або запах речовини, а також наближати нос до країв посудів.

7. При приготуванні розчинів кислот або їх сумішей використовувати захисні окуляри; при цьому щоб запобігти розбризкуванню важку рідину слід вливати до більш легкої (кислоту до води, H_2SO_4 до HNO_3 і ін.); змішувати гарячі кислоти або луги з гарячою водою категорично неприпустимо, так як в цьому випадку відбувається бурний викид рідини із посуду.

8. Роботи з агресивними рідинами виконувати тільки в гумових захисних перчатках. Рідину, що розлита на стіл або підлогу, швидко видаляти сухою ганчіркою, а потім ганчіркою, яка змочена у воді.

9. При хімічних опіках необхідно швидко та якісно промити уражене місце проточною водою та звернутися за кваліфікованою медичною допомогою.

10. З метою уникнення опіків заборонено брати голими руками зразки та обладнання, що не остигло.

11. Категорично заборонено працювати з електрообладнанням і приборами мокрими руками.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Форму на яку наноситься покриття, а також мідний електрод (анод) підвісити у ванні на підвісках; мідний електрод – на мідному або латунному гачку з дроту так, щоб отвір в електроді та гачок не контактували з електролітом з метою запобігання корозії гачка. Форму підвісити на мідний або латунний дріт на відстані 15...20 см від електрода. Електродом, який з'єднаний з позитивним полюсом джерела живлення (анодом), для мідної гальванопластичної ванни слугує мідна пластина товщиною від 3...4 мм і більше. Електродом, до якого приєднано негативний полюс постійного джерела струму (катодом), слугує форма.

2. Приготувати мідний електроліт для гальванопластичних робіт. Його готують на основі кристалогідрату сульфата міді $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ з додаванням сірчаної кислоти H_2SO_4 , для підвищення електропровідності. Для його приготування наважити сульфата міді із розрахунку 150...180 г на 1 л води. Розчинення сульфата міді слід проводити в гарячій або теплій воді. Після повного охолодження розчину та остигання його до кімнатної температури електроліт профільтрувати крізь тканину, а потім до нього обережно додати сірчану кислоту. Сірчану кислоту слід додавати повільно, тонким струменем, з метою запобігання швидкому розігріванню електроліта та його розбризкування, що може призвести до важких опіків.

В мідних сульфатних ваннах вміст сірчаної кислоти слід підтримувати на рівні 30...35 г/л.

Потрібно враховувати наступне:

а) розчинність сульфата міді значно знижується з підвищенням вмісту сірчаної кислоти;

б) при наявності підвищеного вмісту сульфата міді він осаджується у вигляді кристалів по стінках ванни та на аноді, що значно ускладнює процес електролізу.

3. Перед проведенням роботи визначити:

а) матеріал зразка або форми;

б) на підставі обмірювань зразка розрахувати площу його поверхні;

в) масу зразка до нанесення покриття з точністю $\pm 0,01$ г.

4. Знежирений зразок промити проточною водою і піддати активації в 10%-ному розчині HCl (щоб видалити тонку оксидну плівку) безпосередньо перед нанесенням покриття. Зібрати схему електролізера відповідно рис. 4.1. Аноди закріпити так, щоб місце контакту аноду з струмоводом знаходилось вище "ватерлінії" (аби уникнути розчинення струмоводу і потрапляння міді в розчин). Ввімкнути струм і вести електроліз на протязі розрахованого часу до осадження покриття заданої товщини.

5. Після закінчення процесу вимкнути струм, вийняти зразок і аноди з розчину, промити їх проточною водою та висушити. Візуально оцінити якість одержаного покриття.

6. Після нанесення покриття визначити:

а) масу зразка з покриттям (точність $\pm 0,01$ г);

б) середній вихід метала за струмом.

Цей показник є основним критерієм використання електричної енергії в процесі електролізу.

– Середній вихід металу за струмом розрахувати за формулою:

$$\eta = \frac{m}{I \cdot t \cdot c} \cdot 100\%, \quad (4.3)$$

де m – маса металу, що виділився на поверхні зразка, г;
 I – сила струму під час електролізу, А;
 t – тривалість процесу електролізу, год;
 c – електрохімічний еквівалент металу, який осаджується, г/А·год.

Електрохімічний еквівалент міді становить $C_{Cu}=1,186$ г/А·год.

в) товщину шару покриття за перерізом.

Товщину шару покриття розрахувати за формулою:

$$h = \frac{i_k \cdot t \cdot c \cdot \eta \cdot 100}{\rho}, \text{ мкм} \quad (4.4)$$

де i_k – катодна щільність струму, А/см²;
 ρ – густина міді, г/ см³.

Густина міді становить $\rho_{Cu}=8,9$ г/ см³.

г) пористість покриття.

При визначенні пористості покриття на поверхню знежиреного зразка, який попередньо промито та висушено, накладають на 5 хв фільтровальний папір, який змочено розчином, що містить 10 г $K_3[Fe(CN)_6]$ і 15 г NaCl в 1 л H_2O . При цьому в шпаринах покриття утворюються точки туринбулевої сіні за реакцією:



7. Результати дослідів занести до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Характеристика зразків і покриття

№ п/п	Показник	Характеристика або значення показника
1	Матеріал зразка або форми	
2	Площа поверхні зразка, см ²	
3	Маса зразка, г: а) до покриття; б) після покриття	
4	Середній вихід металу за струмом, %	
5	Товщина шару покриття, мкм	
6	Пористість, %	

Зміст звіту

1. Коротко описати технологічний процес нанесення покриттів гальванічним методом з перерахуванням його переваг і недоліків.

2. Навести схему електролізера з позначенням його основних складових.

3. Виконати необхідні виміри та розрахунки і навести протокол проведених досліджень у вигляді таблиці 4.1.

4. За результатами роботи зробити висновок стосовно характеристик і якості покриття, що нанесено гальванічним методом.

Лабораторна робота №5

ОСНОВИ НАНЕСЕННЯ ГАЗОПОЛУМЕНЕВИХ ПОКРИТТІВ

Мета роботи

Ознайомитись з основними принципами нанесення газополуменевих покриттів і обладнанням, яке при цьому застосовується. Навчитися оцінювати якість нанесеного покриття.

Загальні відомості

Загальні відомості до даної лабораторної роботи містять матеріали, що викладено в джерелах [1 - 13].

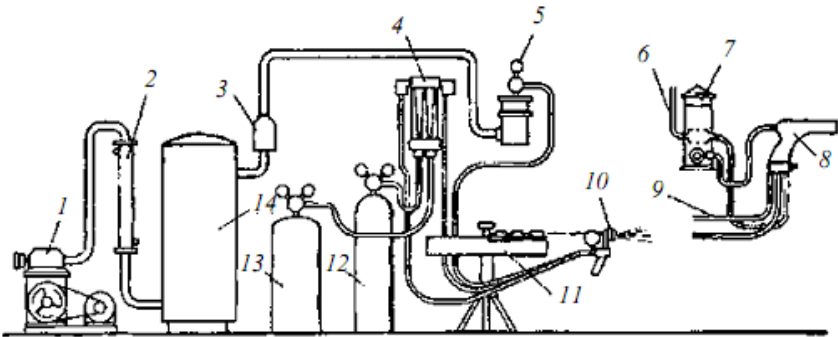
Газополуменевий метод напилення покриттів складається з формування на поверхні шару з частинок матеріалу, які мають достатній запас теплової та кінетичної енергії внаслідок взаємодії з газополуменевим струменем. Газове полум'я отримують шляхом згоряння горючих газів у кисні або повітрі. У спеціальних пальниках (розпилювачах) по периферії сопла подається горюча суміш, центральна частина призначена для подачі у сформований газополуменевий струмінь розпилюваного матеріалу. У таблиці 5.1 наведена температура полум'я для сумішей різного складу.

Таблиця 5.1 – Температура згоряння деяких сумішей газів [1]

№ п/п	Склад суміші	Температура, °С
1	Кисень - ацетилен	3100...3200
2	Кисень - бутан	3100
3	Кисень - пропан	2760
4	Кисень - водень	2700
5	Повітря - ацетилен	2325
6	Повітря - водень	2055

У якості робочих газів найчастіше використовують ацетилен (ГОСТ 5457-75), кисень (ГОСТ 5583-79), пропан-бутан (ГОСТ 20448-80), азот (ГОСТ 9293-74) або стиснене повітря, яке очищене від вологи та мастила.

Технологічне обладнання для газополуменового напилення покриттів складається з основного і допоміжного (для підготовчих і фінішних операцій). До складу установки для газотермічного напилювання входять розпилювач (пальник); механізм подачі розпилюваного матеріалу (дроту або порошку); джерело енергопостачання; система подачі розпилювальних газів; пульт керування. У деяких установках передбачено систему охолодження. Функціональну схему узагальненої установки для газотермічного напилення показано на рис. 5.1.



1 - компресор; 2 - теплообмінник; 3 - осушувач; 4 - витратомір; 5 - редуктор для регулювання подачі стисненого повітря; 6 - підвід до редуктора подачі стиснутого повітря; 7 - бункер для порошку; 8 - пальник для напилювання порошку; 9 - шланг до витратоміра; 10 - пальник для розпилювання дроту; 11 - бухта дроту; 12 - кисневий балон; 13 - ацетиленовий балон; 14 – ресивер;

Рисунок 5.1 – Схема установки для газополуменового напилення дротом і порошком [3].

До установок для напилення входять (залежно від призначення) пальники ГН-1, ГН-2, ГН-3. Це ацетиленокисневі факельні пальники двостадійного змішування, в яких спочатку порошок інжектуються киснем, далі киснево-порошкова суміш інжектуються ацетиленом. Товщина наплавки (напилення) становить до 1,5 мм. Пальник ГН-3 відрізняється від ГН-1, ГН-2 вищою потужністю і особливістю конструкції нижньої частини вузла подачі порошку (передбачено пристрій, який забезпечує всмоктування повітря з атмосфери). Пальник ГН-4 застосовують для наплавлення і напилення тіл

обертання. Порошок у цьому пальнику транспортується через центральний канал киснем у зону полум'я, яке концентрично витікає із багатофакельного мундштука.

Металізатор МПІ-4 застосовують для напилення газовим полум'ям вручну дротом. Випускають різновиди МПІ-4А - для роботи ацетиленокисневою сумішшю і МПІ-4П - для роботи пропан-бутаново-кисневою сумішшю, МПІ-5 має надійнішу конструкцію вузла подачі дроту. Для напилення покриттів на деталі типу "вал" металізатори монтуються на супорті токарного верстата. Дріт діаметром 1,5...2,5 мм подається повітряною турбіною з відцентровим регулятором зі швидкістю 1,0...7,5 м/хв.

Газополуменеві розпилювачі. Залежно від способу подачі горючого газу відрізняють інжекторні та безінжекторні розпилювальні пристрої. На виході з інжектора розвивається висока швидкість витікання кисню і місцеве розрідження. Підсмоктування горючого газу здійснюється через периферійні канали інжектора. За наявності інжектора розпилювач може працювати із застосуванням горючого газу, який перебуває під низьким тиском. Це важливо для ацетилену, який отримують від переносних ацетиленових генераторів низького тиску (0,005...0,010 МПа). За більш високих тисків горючого газу роль інжекції знижується. У випадку однакових або близьких тисків кисню і горючого газу може здійснюватися безінжекторна подача. Наявність інжектора забезпечує універсальність розпилювача щодо тиску горючого газу. Найвища температура полум'я досягається використанням ацетиленокисневих сумішей. Вищу теплотворну здатність мають пропан і бутан. Тому для напилення найчастіше застосовують ацетилен технічний (ГОСТ 54-57-75) або пропан-бутанову суміш (ГОСТ 20448-80). Під час утворення газополуменевого струменя тепловий ККД розпилювача становить 0,8...0,9, ефективний ККД нагрівання частинок порошку лише 0,02...0,12. Гази постачаються головним чином у балонах місткістю 40 л під тиском 1,6 МПа (C_2H_2), що відповідає 6 м³ газу за нормального тиску. Для додаткового розпилювання у разі газополуменевого розпилювання використовують повітря. Роль газуносія виконує кисень.

Якщо використовується стиснуте повітря, то воно постачається від спеціального компресора або заводської мережі до ресивера. Призначення ресивера полягає у вирівнюванні пульсації повітряного

тиску під час розпилювання. Із ресивера повітря спрямовується до газової магістралі, яка складається із запірнього вентиля, редуктора, який регулює тиск, ротаметра і мастиловологовіддільника. Мастиловологовіддільник призначено для очищення повітря від мастила і вологи. Це циліндрична зварна конструкція зі знімною кришкою. Фільтр складається з повстяних прошарків і коксових наповнень, розділених на декілька секцій. Повсть затримує мастило, а кокс вологу. Фільтр замінюють не менше двох разів на місяць за нормальної експлуатації.

Ротаметри складаються із градуйованої скляної трубки, внутрішня поверхня якої має форму конуса. В робочому стані трубку встановлюють вертикально конусом униз. У середині трубки знаходиться поплавков. Його верхня кромка гостра, а на бічній поверхні нанесено гвинтоподібні прорізи. Під час проходження потоку через трубку поплавок обертається. Це забезпечує рівномірний кільцевий зазор між поплавком і стінками трубки. На поверхні трубки нанесено градування. Положення поплавка в трубці показує витрату газу через ротаметр. Часто для вимірювання витрати газу використовують вимірювальні діафрагми (дюзи).

Горючий газ і окиснювач (кисень, рідко повітря) подають до змішувальної камери. Далі горюча суміш надходить до соплового пристрою. На виході з нього суміш підпалюється і утворює факел газового полум'я. Для стиснення полум'я застосовують додаткове сопло, в яке подають стиснутий газ, здебільшого повітря. Зовнішній потік газу подовжує високотемпературну частину газового потоку, підвищує її температуру і швидкість. У деяких газополумєневих установках стиснений газ використовують для охолодження теплонавантажених елементів розпилювача.

Розпилюваний матеріал у вигляді порошку або дроту (стрижня) подають по осі газополумєневого струменя. Такий спосіб подачі зумовлює більш інтенсивне нагрівання і розпилювання матеріалу. В основу класифікації способів газополумєневого напилення покладено такі ознаки: вид розпилюваного матеріалу (газополумєневе напилення порошковими і дрововими матеріалами), тип горючого газу (напилювання з використанням ацетилену, пропану, бутану, їх сумішей та ін.), ступінь механізації (ручне і механізоване напилювання).

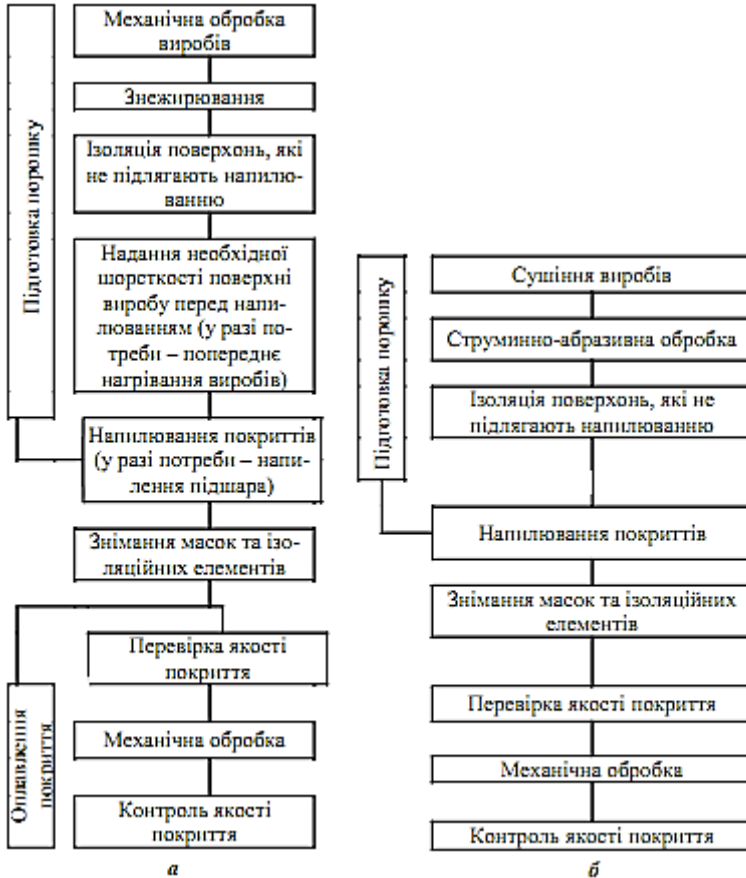
Основні переваги газополумєневого напилення покриттів такі:

- можливість отримання покриттів з більшості матеріалів, які розплавляються за температури до 2800 °С без розкладання;
- відносно малий тепловий вплив на виріб (у межах 350...150°C), що дає змогу напилювати покриття на поверхню широкого кола матеріалів, зокрема пластмаси, дерева, картон та ін.;
- товщина покриття може бути в межах від 50 мкм до 10 мм і більше;
- можливість регулювання газового режиму роботи: пальник дозволяє керувати хімічним складом середовища (відновлювальне, нейтральне, окиснювальне) і енергетичними характеристиками струменя та напилюваних частинок;
- висока продуктивність процесу (до 10 кг/год), наприклад 8...10 кг/год для самофлюсівного порошку сплаву типу ПГ-СР4 при витраті ацетилену 0,9 м³/год, і високий коефіцієнт використання матеріалу (0,60...0,95);
- відносно низький рівень шуму і випромінювання: можливість нанесення покриттів за будь-якого просторового розміщення апарата;
- простота обслуговування;
- гнучкість технології і мобільність обладнання, що дозволяє проводити напилення на місці, без демонтажу деталей;
- можливість автоматизації процесу і вмонтування в автоматичну лінію з невеликими витратами та ін.

Основними недоліками газополуменевого методу напилювання покриттів є:

- не завжди достатня міцність зчеплення покриттів з основою (5...45 МПа) у разі випробування на нормальний відрив;
- наявність пористості (5...25 %), яка обмежує застосування покриттів у корозійних середовищах без додаткової обробки;
- невисокий коефіцієнт використання енергії газополуменевого струменя на нагрівання порошку (2...12 %);
- неможливість нанесення покриттів із тугоплавких матеріалів з температурою плавлення більше 2800 °С.

Процес отримання покриттів газополуменевим методом - це сукупність прийомів і операцій, які виконуються у послідовності, що показано в загальному вигляді на рис. 5.2.



а - для металевих виробів; б - для виробів з неметалевих матеріалів;

Рисунок 5.2 – Технологічна схема отримання покриттів газополумєним методом [1].

Вказівки з техніки безпеки

До роботи на установках для газополумєного напилення покриттів допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, навчання прийомів роботи на газополумєному обладнанні, загальний інструктаж з техніки безпеки, а також

інструктаж на робочому місці і мають посвідчення газозварювальника. Категорично не допускаються до роботи сторонні особи.

Особи, які працюють на установках для газополуменевого напилювання, повинні забезпечуватися спецодягом, спецвзуттям і засобами індивідуального захисту. Обов'язково необхідно:

- перед початком робіт ввімкнути витяжну вентиляцію;
- газові балони відкривати без ударів спеціальним ключем;
- роботи проводити на відстані не ближче 10 м від балону з ацетиленом;
- кисневий балон всіляко захищати від контакту з мастильними матеріалами;
- спостерігати за процесом допускається лише через спеціальні окуляри-світлофільтри.

Контрольні запитання

1. В чому суть газополуменевого методу нанесення покриттів?
2. Які гази використовуються для отримання горючої суміші?
3. Яку теплотворну здатність мають різні горючі суміші?
4. З яких функціональних частин складається установка для газотермічного нанесення покриттів?
5. Що є робочим інструментом при нанесенні газополумених покриттів?
6. Наведіть основні переваги газополуменевого методу нанесення покриттів.
7. В чому полягають основні недоліки газополуменевого методу?
8. Наведіть технологічну схему (основну сукупність прийомів і операцій) отримання покриттів газополуменим методом.
9. В чому полягають основні вимоги безпеки при застосуванні газополуменевого методу нанесення покриттів?

Обладнання, матеріали, інструмент

1. Ацетиленовий балон з редуктором.
2. Кисневий балон з редуктором.
3. Пальник типу ГН-3 з комплектом змінних наконечників.

4. Матеріал порошковий ПН85Ю15.
5. Зразки сталеві 100x50x3 мм.
6. Спеціальні окуляри-світлофільтри.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Вивчити будову, принцип роботи установки для газополуменевого нанесення покриттів, а також газового пальника ГН-3.
2. Запалити зварювальне полум'я, відрегулювати потрібний для нанесення покриття вид полум'я. Провести нанесення покриття.
3. Після охолодження зразків оцінити якість покриття.
4. Розрізати зразок, зробити шліф.
5. Провести макро- і мікроаналіз металу покриття.

Зміст звіту

1. Коротко дати характеристику газополуменевого способу нанесення покриттів.
2. Перелічити обладнання та матеріали, які використовуються при даному способі нанесення покриттів.
3. За отриманим завданням записати вихідні дані та параметри режиму нанесення (спосіб нанесення; марку матеріалу; витрати ацетилену і кисню та ацетилену).
4. Візуальним оглядом та металографічним дослідженням оцінити якість нанесеного покриття; описати, що можна визначити при макро- та мікроаналізі.
5. Навести структуру газополуменевого покриття.
6. Зробити висновки про можливості використання газополумених покриттів.

Лабораторна робота №6

МЕТАЛЕВІ ПОКРИТТЯ, ЩО НАНОСЯТЬСЯ З РОЗПЛАВУ

Мета роботи

Ознайомитись з основними принципами нанесення металевих захисних покриттів з розплавів і отримати практичні навички. Навчитися оцінювати якість нанесеного покриття.

Загальні відомості

Загальні відомості до даної лабораторної роботи містять матеріали, що викладено в джерелах [1 - 13].

Покриття виробів зануренням їх до розплавленого металу – простий та розповсюджений в техніці захисту металів від корозії спосіб. Якість гарячого покриття значною мірою залежить від попереднього оброблення виробу флюсом, при якому з поверхні виробу видаляються солі, оксиди, шлакові включення, нерозчинні в кислотах карбіди, волога та інші з'єднання, що залишилися після травлення. Оброблення поверхні виробу флюсом предостереігає її від окиснення в момент занурення виробу до розплавленого металу та забезпечує краще змочування його поверхні цим розплавом.

При гарячому способі покриття на поверхні деталі утворюється захисна металева плівка з проміжними шарами. Наприклад, при гарячому цинкуванні утворюються проміжні шари: FeZn_{13} , FeZn_{10} , FeZn_7 , твердий α -розчин цинка в залізі. Шари інтерметалідів, що утворилися, значно знижують еластичність покриття, що може призводити до зниження захисних властивостей. Також інтерметаліди значно збільшують можливість крихкого руйнування цинкового покриття.

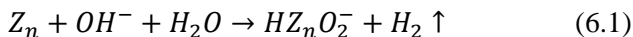
Основні переваги гарячого способу отримання металопокриттів – простота і висока швидкість процесу, внаслідок чого цей спосіб зараз широко розповсюджений. Переваги гарячого методу цинкування перед електролітичним чітко спостерігаються в тих випадках, коли необхідно наносити товсті цинкові покриття (до 100 мкм), тобто захищати вироби і конструкції на тривалий термін експлуатації в

агресивному навколишньому середовищі (захист опор високовольтних передач, обладнання в копальнях та ін.).

Основні недоліки способу – високі витрати захисних металів; нерівномірність металевого покриття на різних ділянках поверхні виробів у порівнянні, наприклад, з електролітичними покриттями; обмежена продуктивність.

Практичне використання знаходять гарячі покриття алюмінієм, цинком, оловом, свинцем, а також їх сплавами. Наприклад, гарячим способом наносять покриття на кровельне залізо та вироби з нього (ведра, жолоби та ін.), дріт, чавунні виливки та ін.

Цинкові покриття отримують зануренням до розплаву та електроосадженням (електроосаджені покриття більш пластичні та менш крихкі). Покриття з цинку стійкі до атмосферної корозії. Шар товщиною 0,03 мм має строк експлуатації в сільських і приміських районах до 11 років, у морських – 8, у промисловій атмосфері – 4 роки. Найменша швидкість корозії – при рН=7...12. При рН>12,5 цинк реагує наступним чином:



Цинкові покриття добре захищають сталь у морській воді: за 1 рік витрачається шар товщиною 0,03 мм. Таким чином, наприклад, покриття товщиною 0,13...0,15 мм захищає сталь упродовж 4...5 років. У аерованій гарячій воді захист неефективний, оскільки інтенсивно з'являються піттингі. Це явище не спостерігається якщо вода холодна ($t < 50^\circ\text{C}$). Цинкові покриття стійкі не тільки у вологому повітрі, але і у повітрі, яке забруднено CO_2 . Вони добре захищають метал у бензині, мастилі та органічних розчинниках. Нестійкі в кислих і лужних середовищах.

Найбільш часто цинкують труби, окремі деталі машин, сталеві листи та листи для покриття покрівель.

Алюмінієві покриття отримують в основному гарячим методом (занурення до розплаву) або металізацією. До розплаву зазвичай додають кремній, щоб ускладнити утворення крихкого шару. Алюмінієві покриття застосовують для захисту опалювальних систем та відвідних газових трактів автомобілів. Використання для захисту від атмосферної корозії обмежено із розрахунку їх більш високої вартості у порівнянні з цинковими. В м'якій воді покриття стійке. У

морській воді може відбутися зміна полярності пари Al-Fe і покриття може стати протекторним. Дуже стійке покриття із сплаву Al-Zn (і у промисловій та морській атмосферах). Алюмінієві покриття у промисловій атмосфері слугують до 12 років, тоді як цинкові у тих же умовах – тільки 7 років.

Обладнання, інструмент, матеріали

1. Піч опору.
2. Керамічний тигель.
3. Кліщі.
4. Рукавиці та захисні окуляри.
5. Лист азбесту.
6. Аналітичні ваги.
7. Оптичний мікроскоп та лупа.
8. Зразки для нанесення покриттів (сталеві прутки).
9. Штангенциркуль.
10. Термопара.
11. Секундомір.
12. Кусок тканини із бавовни.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Отримати гаряче алюмінієве покриття на сталевих зразках.

Дванадцять сталевих зразків \varnothing 6 мм обезжирити кашицею, яка складається з $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і CaCO_3 у співвідношенні 1:1; ретельно промити у холодній воді, занурити на 15 хвилин у гарячий (60°C) 10%-й розчин H_2SO_4 ; промити в проточній холодній воді та залишити в ній до повної готовності ванни гарячого алюмініювання.

Алюмініювання проводити у керамічному тиглі, в якому знаходиться розплав сплаву АК7ч (АЛ9), що містить до 6,0...8,0 мас.% Si.

Температуру розплаву підтримувати з точністю $750\pm 5^\circ\text{C}$ і контролювати за допомогою термопари та електронного регулятора.

Перед проведенням алюмініювання необхідно покласти коло печі секундомір, кліщі, лист азбесту, рукавиці, кусок тканини із бавовни; зняти окислений метал з поверхні розплаву.

Взяти один зразок, потім надіти рукавиці та захисні окуляри, кліщами захватити зразок і занурити його до розплаву. Зразок вийняти з ванни після витримки в зануреному стані, покласти на лист азбесту і швидко видалити куском тканини із бавовни напливи розплаву з обох сторін зразка. Послідовно проводити ці операції з іншими зразками.

Аналогічно отримати покриття на трьох наступних групах зразків (по три зразка в кожній), але при витримці їх у ванні впродовж 30, 60 і 90 сек.

2. Якісно визначити міцність зчеплення плівки з основним металом.

Зразки з нанесеним покриттям затиснути у лещатах та по черзі згинати до тих пір поки покриття не почне відшаровуватись або зразки не зруйнуються. Потім за допомогою лупи досліджують місце відшаровування покриття або лінію зламу. Зчеплення покриття вважається добрим, якщо міцний зв'язок покриття з основним металом зберігся на 95% довжини зламу. Також міцність зчеплення покриття вважається тим кращою, чим при більшому куті загину зразка відбулося відшаровування або при більшій кількості циклів загину.

3. Якісно визначити вплив часу нанесення покриття на міцність зчеплення шару алюмінію з основою.

Аналізуючи поведінку різних груп зразків з покриттям при визначенні міцності зчеплення з основним металом (див. п. 2) та результати досліджень, зробити висновок щодо впливу часу нанесення покриття на міцність зчеплення алюмінієвого покриття із сталевією основою.

4. Визначити вплив тривалості нанесення покриттів на товщину шару алюмінію.

Товщину шару покриття розраховують за формулою:

$$h = \frac{\Delta m \cdot 10000}{S \cdot \rho} \text{ мкм}, \quad (6.2)$$

де Δm – зміна ваги зразка після нанесення покриття, г;

S – площа поверхні зразка, см^2 ;

$\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$ – густина алюмінію.

6. Обробити результати дослідів

Результати дослідів усереднити та занести до таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Середні результати досліджень

Номер зразка	Якісно оцінена (не задовільна, задовільна, добра, відмінна)		Товщина шару покриття за час, мкм		
	Міцність зчеплення плівки з основним металом	Якість покриття за зовнішнім виглядом	30 сек	60 сек	90 сек

Примітка:

- матеріал зразків;
- температура розплаву $t = \text{_____} \pm \text{_____}, ^\circ\text{C}$;
- точність вимірювань лінійних розмірів зразків
 $\Delta l = \text{_____} \pm \text{_____}, \text{мм}$;
- точність визначення ваги $\Delta m = \text{_____} \pm \text{_____}, \text{г}$.

За отриманими результатами побудувати графік залежності товщини шару алюмінієвого покриття від часу його нанесення (по осі абсцис – час нанесення покриття в секундах, по осі ординат – товщина шару покриття в мікрометрах).

Зробити висновки за результатами роботи та за аналізом графіку.

Зміст звіту

1. Коротко описати технологічну схему процесу гарячого алюмініювання.

2. Привести основні переваги та недоліки цього методу нанесення покриттів.

3. Навести таблицю з результатами експериментів.

4. Побудувати та навести графік залежності товщини шару алюмінієвого покриття від часу його нанесення.

Контрольні запитання

1. Що таке гаряче алюмінівання та цинкування?
2. З якою метою проводиться алюмінівання та цинкування?
3. Які матеріали та складові необхідні для проведення процесів?
4. В чому полягають переваги та недоліки методу гарячого нанесення металевих покриттів?
5. Як якісно визначити для покриття міцність зчеплення шару з основою?
6. Як визначити товщину покриття?

Рекомендована 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. 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. 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. Збожна О.М. Основи технології: Навчальний посібник / О.М. Збожна. – Тернопіль: Карг-бланш, 2002. – 486 с.
6. Широкобокова Н.В. Поверхнєве зміцнення вторинних силумінів методом лазерної обробки: дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01 / Широкобокова Наталія Вікторівна. – Запоріжжя, 2013. - 137 с.
7. Дубовий О.М., Лебедева Н.Ю., Шумов С.М. Збірник лабораторних робіт з дисциплін «Фізико-хімічні основи створення покриттів» і «Технологія нанесення покриттів». – Миколаїв: НУК, 2004. – 76 с.
8. <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/36387/1/Pokryttya-u-pryladobud.pdf>
9. <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/39449/3/Kontol-pokryttya.pdf>
10. <http://www.univer.kharkov.ua/images/redactor/news/2013-06-21/beresnev.pdf>
11. <http://www.nanoindustry.su/journal/article/2717>
12. <https://metallizator.com.ua/nanesenie-pokrytyi>
13. <http://pminstitute.by/produce/materialy>