

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ

**Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка
освітня програма “Технології та устаткування зварювання”**

Обговорено і рекомендовано на
засіданні кафедри ЗВ та АПБК
Протокол № 12
від 21.06.2019 р.

Чернігів ЧНТУ 2019

Інженерія поверхні. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка (освітня програма “Технології та устаткування зварювання”) / Укл.: Новомлинець О.О., Ющенко С.М., Нагорна І.В. – Чернігів: ЧНТУ, 2019. – 67 с.

Укладачі: Новомлинець Олег Олександрович, доктор технічних наук, доцент,
Ющенко Світлана Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент,
Нагорна Ірина В’ячеславівна, асистент

Відповідальний за випуск: Прибисько Ірина Олександрівна, завідувач кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій, кандидат технічних наук, доцент

Рецензент: Олексієнко Сергій Владиславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій

ЗМІСТ

Вступ.....	4
<i>Третій семестр</i>	
1 Лабораторна робота №1 Дослідження процесів автовакуумування та сублімації в герметичних об'ємах при контакті різнорідних металів.....	5
2 Лабораторна робота №2 Дослідження впливу газового середовища на змочування твердих тіл.....	8
3 Лабораторна робота №3 Дослідження впливу шорсткості поверхні на змочування твердих тіл.....	13
4 Лабораторна робота №4 Вивчення електроконтактних явищ.....	17
5 Лабораторна робота №5 Основні методи контролю адгезії.....	20
6 Лабораторна робота №6 Основні методи очистки поверхні.....	24
7 Лабораторна робота №7 Вивчення впливу стану поверхні на контактний опір.....	28
<i>Четвертий семестр</i>	
8 Лабораторна робота №8 Абразивне зношування.....	30
9 Лабораторна робота №9 Вплив середовища на зношування.....	33
10 Лабораторна робота №10 Визначення зносостійкості тонких покриттів.....	36
11 Лабораторна робота №11 Визначення блиску покриття по коефіцієнту відображення світла.....	38
12 Лабораторна робота №12 Визначення сил тертя.....	41
13 Лабораторна робота №13 Визначення електричного потенціалу трибоелектричним методом.....	44
<i>П'ятий семестр</i>	
14 Лабораторна робота №14 Вивчення будови і роботи установки для газотермічного розпилення порошків УПТР-87.....	46
15 Лабораторна робота №15 Будова установки для детонаційного напилювання "ДНЕПР – 3".....	50
16 Лабораторна робота №16 Технологія термічного вакуумного напилення.....	54
17 Лабораторна робота №17 Технологія електрохімічного нанесення покриттів.....	59
18 Лабораторна робота №18 Технологія термічного оксидування.....	63
19 Лабораторна робота №19 Визначення міцності зчеплення покриттів з основою.....	65
Рекомендована література.....	67

ВСТУП

Методичні вказівки з описом лабораторних робіт з курсу “Інженерія поверхні” для студентів спеціальності 131 Прикладна механіка (освітня програма “Технології та устаткування зварювання”) розраховані на використання студентами протягом трьох семестрів вивчення дисципліни – з третього по п’ятий семестр.

Методичний посібник забезпечує можливість студентам перед виконанням роботи ознайомитися зі змістом лабораторної роботи і методикою її проведення та коротко повторити лекційний матеріал: 1 – про основні фізико-хімічні властивості поверхневих шарів, про поверхневі явища, що відбуваються при зварюванні, паянні та нанесенні покриттів, про способи підготовки та очищення поверхні; 2 – про критерії якості поверхонь деталей машин, про основні види зношування деталей пар тертя та робочих органів машин; методи підвищення зносостійкості деталей машин та вузлів тертя; 3 – про основні способи нанесення покриттів, їх технологію та обладнання; процеси, що відбуваються при різних способах нанесення покриттів; види покриттів та основні матеріали для їх створення; методи контролю якості покриттів.

В описі кожної лабораторної роботи викладені мета, короткі теоретичні відомості, порядок проведення роботи, контрольні питання для самоперевірки.

У результаті виконання лабораторних робіт студент зможе самостійно вирішувати наступні практичні задачі:

1. Визначити необхідний спосіб підготовки поверхонь перед зварюванням або паянням, в залежності від матеріалу, способу отримання нероз’ємних з’єднань та вимог до якості.
2. Визначити механізм утворення нероз’ємних з’єднань, в залежності від природи матеріалу, що зварюється.
3. Проводити підготовку поверхонь перед зварюванням та паянням.
4. Визначити методику дослідження зносостійкості конструкційних матеріалів.
5. Проводити вимірювання зносу деталі при різних видах зношування.
6. Визначити природу матеріалу, використовуючи трибоелектричний ефект.
7. Визначити необхідний матеріал покриття та спосіб нанесення для кожного окремого виробу, в залежності від його експлуатаційних характеристик.
8. Визначити спосіб попередньої обробки поверхні для нанесення покриття.
9. Проводити нанесення покриття.
10. Оцінювати якість підготовки поверхонь та якість захисного шару.

1 Лабораторна робота №1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ АВТОВАКУУМУВАННЯ ТА СУБЛІМАЦІЇ В ГЕРМЕТИЧНИХ ОБ'ЄМАХ ПРИ КОНТАКТІ РІЗНОРІДНИХ МЕТАЛІВ

Мета роботи: дослідити процес сублімації металів при нагріві в умовах автовакууму.

1.1 Короткі теоретичні відомості

Сублімація – один з видів фазових переходів першого роду, коли тверде тіло відразу ж перетворюється у пар, минаючи рідку фазу. Сублімація існує в певному інтервалі температур і тисків і супроводжується поглинанням теплоти (*теплота сублімації*). Кінетичною характеристикою сублімації служить її швидкість (маса речовини, що переходить із твердого стану в газоподібний за одиницю часу), що залежить від типу твердого тіла (метал, діелектрик), температури його поверхні, тиску його насиченого пару і швидкості відводу парів від поверхні. Сублімацію використовують для очищення твердого тіла від поверхневих плівок та для нанесення покриття у вакуумі.

При зварюванні в твердій фазі у початковий момент прикладання навантаження, внаслідок шорсткості поверхонь, сумарна площа контакту становить не більше 1-2 % від номінальної площі контакту. Тобто, протягом усього часу нагріву й утворення фізичного контакту, у стику перебувають мікрооб'єми та макрооб'єми, заповнені повітрям (рисунок 1.1).

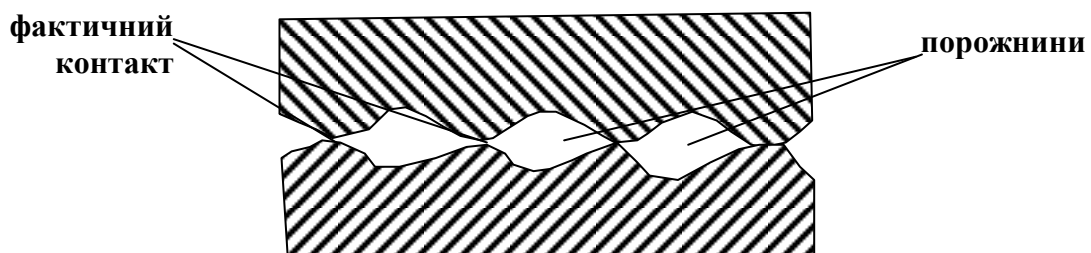
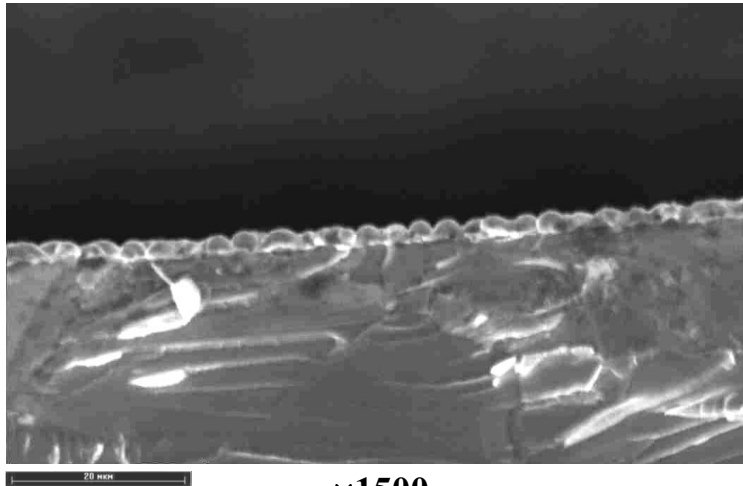


Рисунок 1.1 – Схема контактування шорстких поверхонь при зварюванні в твердій фазі до утворення фізичного контакту

При нагріві зразків, що з'єднуються, у зоні контакту йдуть процеси розчинення газів повітря в металі й відбувається автовакуумування, тобто утворюється розрідження. В умовах автовакуумування, при визначеному температурно-часовому інтервалі попереднього підігріву, до утворення фізичного контакту при зварюванні різномірних матеріалів відбувається сублімація одного з металів та його конденсація на поверхні іншого (рисунок 1.2).

Таким чином, внаслідок автовакуумування та сублімації, у стикі відбувається утворення проміжних тонких прошарків з ультрадисперсних конденсатів, наявність яких прискорює дифузійні процеси і підвищує якість зварних з'єднань.

Покриття на металах, отримані сублімацією при нагріванні в умовах автовакууму, істотно відрізняються за структурою від вакуумних покриттів товщиною порядку 1 мкм. У таких покриттях переважає стовпчаста структура з наскрізними порами, а покриття товщиною порядку 1 мкм, отримані іонним методом, мають дрібнозернисту структуру без пор.



×1500

Рисунок 1.2 – Конденсат міді на хромі (злам) після відпалу 60 хвилин (зйомка на JSM-840)

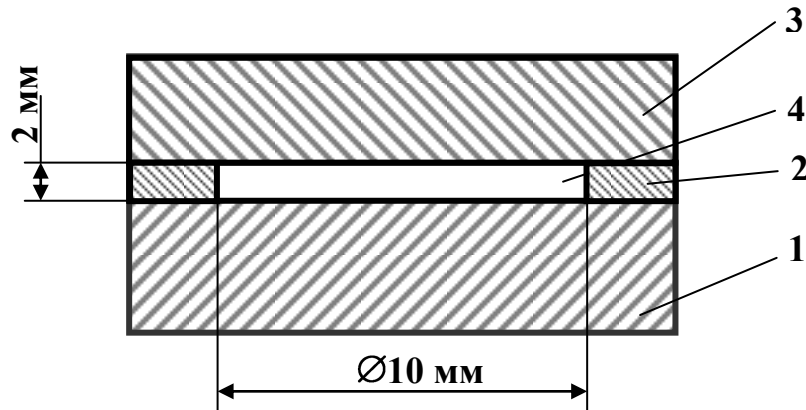
1.2 Обладнання та матеріали

Муфельна піч, оптичний мікроскоп, струбцина, зразки міді, титану, хрому, молібдену та нержавіючої сталі.

1.3 Хід виконання роботи

- 1.3.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.
- 1.3.2 Підготувати зразок моделюючий герметичний об'єм (рисунок 1.3). Елементи 1 і 2 зразка виготовити з міді, а елемент 3 з Ti, Mo, Cr або X18H10T.
- 1.3.3 Досліджувані поверхні пластин 1, 3 попередньо відполірувати й знежирити ацетоном.
- 1.3.4 За допомогою струбцини зібрати зразок. При цьому герметизація замкнутого об'єму, обмеженого елементами 1, 2, 3, досягається в результаті схоплювання контактуючих поверхонь при незначному зусиллі стиску зразка як у процесі збірки так і в період нагріву.
- 1.3.5 Завантажити збірку у муфельну піч та витримати протягом 15 – 20 хвилин при температурі 800-830 °C (пара Cu-Ti), 950-980 °C (пара Cu-Mo, Cr або X18H10T).

- 1.3.6 Після охолодження елементи зразка 1, 2, 3 відокремити один від одного й дослідити топографію й структуру внутрішніх поверхонь на оптичному мікроскопі.
- 1.3.7 Зробити аналіз процесів, що відбулись у герметичних об'ємах. Замалювати топографію поверхні конденсату.



1 – мідна пластина; 2 – кільце з міді; 3 – пластина з Ti, Cr, Mo або сталь X18H10T; 4 – герметичний об'єм

Рисунок 1.3 – Зразок для дослідження сублімації

1.4 Зміст звіту

- 1.4.1 Назва роботи, мета і короткі теоретичні відомості.
- 1.4.2 Порядок виконання роботи.
- 1.4.3 Результати досліджень, аналіз отриманих даних, висновки по роботі.

1.5 Контрольні запитання

- 1.5.1 Дати визначення сублімації. Різниця між випаровуванням та сублімацією.
- 1.5.2 Механізм створення герметичних мікрооб'ємів при зварюванні в твердій фазі.
- 1.5.3 Охарактеризувати процес автовакуумування герметичних об'ємів.
- 1.5.4 Приклади використання автовакуумування.
- 1.5.5 Роль тонких прошарків при зварюванні в твердій фазі.

2 Лабораторна робота №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЗМОЧУВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

Мета роботи: дослідити процес розтікання евтектики алюміній-кремній на поверхні титану на повітрі і у вакуумі.

2.1 Короткі теоретичні відомості

Змочування поверхні твердого тіла рідиною впливає на багато сторін процесів зварювання, пайки, напилювання.

Величина, чисельно рівна роботі оборотного ізотермічного утворення одиниці поверхні рідкого або твердого тіла, називається коефіцієнтом поверхневого натягу, або питомою вільною поверхневою енергією. У літературі звичайно користуються терміном «поверхневий натяг», що є лише математичним поняттям, еквівалентним поняттю вільної поверхневої енергії, у дійсності ж натягу вздовж поверхні не існує.

Коефіцієнт поверхневого натягу σ – сила, що діє в поверхневому шарі конденсованої фази по дотичній до поверхні на одиницю довжини лінії. Ця сила, виникає в будь-якій рідині та прагне зменшити площу поверхні. В присутності інших сил поверхневий натяг надає би краплі сферичну форму, так як із усіх тіл рівного об'єму куля володіє мінімальною поверхнею. Вимірюється в Дж/м² або Н/м. Вільною поверхневою енергією володіють також поверхні розділу між будь-якими дотичними тілами, які можуть бути й рідкими, і твердими. У цьому випадку надлишок вільної енергії найчастіше називають *міжфазною вільною енергією*. Величина *міжфазного натягу* обумовлена переважним притяганням однієї з фаз часток приграничного шару.

При потраплянні рідини на поверхню твердого тіла залежно від поверхневого натягу фаз і міжфазного натягу на границі контакту рідина може розтікатися або не розтікатися. При розтіканні рідини загальна зміна поверхневої енергії на одиницю поверхні:

$$\partial F = \sigma_{ж-г} + \sigma_{г-ж} - \sigma_{г-г} , \quad (2.1)$$

де $\sigma_{ж-г}$ – поверхневий натяг рідини;

$\sigma_{г-ж}$ – міжфазний натяг на границі тверде тіло – рідина;

$\sigma_{г-г}$ – поверхневий натяг твердого тіла.

Вільна енергія системи зменшується тільки в тому випадку, якщо виконується нерівність:

$$\sigma_{T-г} > \sigma_{ж-г} + \sigma_{T-ж} . \quad (2.2)$$

Отже, і сам процес розтікання можливий тільки у випадку виконання нерівності (2.2), що з урахуванням рівняння Дюпре (робота адгезії: $W_a = \sigma_A + \sigma_B - \sigma_{AB}$, де σ_A і σ_B – поверхневий натяг фаз A і B , σ_{AB} – міжфазний натяг на границі між фазами A і B) можна записати в такий спосіб:

$$W_a > 2\sigma_{ж-г} . \quad (2.3)$$

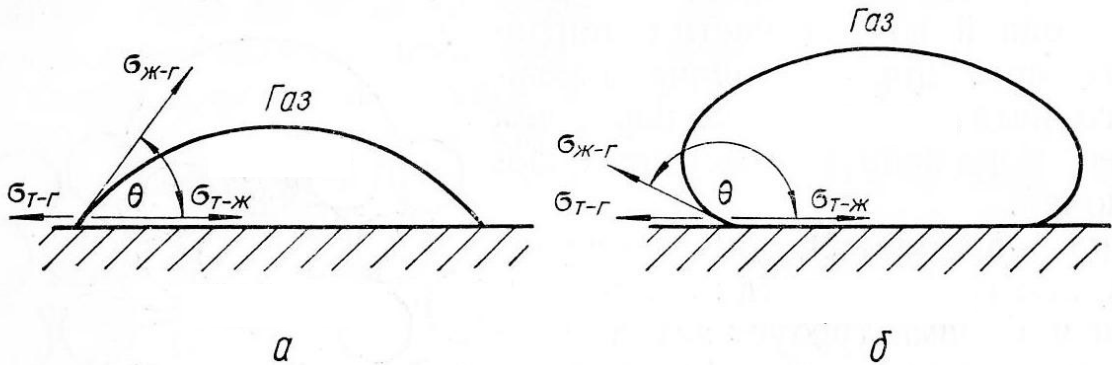


Рисунок 2.1 – Крапля рідини на поверхні твердого тіла: a – гарне змочування; b – погане змочування

З виразу (2.3) витікає, що інтенсивність розтікання рідини підвищується з ростом величини адгезії рідини до твердого тіла й зі зменшенням когезії рідини. При контакті рідини із твердим тілом (рисунок 2.1) величина адгезії визначається з рівняння:

$$W_a = \sigma_{ж-г} (1 + \cos\theta) \quad (2.4)$$

Тому показником співвідношення між цими силами може служити величина крайового кута змочування θ , що є найважливішою характеристикою границі розділу трьох фаз.

Величина рівноважного кута змочування визначається співвідношенням значень питомої вільної енергії:

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{T-г} - \sigma_{T-ж}}{\sigma_{ж-г}} , \quad (2.5)$$

або

$$\cos \theta = W_a / \sigma_{ж-г} - 1. \quad (2.6)$$

Таким чином, двома межами стану є повна відсутність змочування, коли $\theta = 180^\circ$ і повне змочування коли $\theta = 0^\circ$. При $0^\circ < \theta < 180^\circ$ має місце часткове змочування. Однак величина θ залежить не тільки від співвідношення між W_a і $\sigma_{ж-г}$, але й від стану поверхні твердого тіла, її шорсткості, нахилу поверхні й т.д. Тому при визначенні θ варто враховувати всі ці фактори, а також пам'ятати, що при розтіканні ця величина звичайно відрізняється від рівноважного значення.

В випадку розтікання однієї рідини по поверхні іншої, цей процес, як і при розтіканні рідини по поверхні твердого тіла, пов'язаний з роботою адгезії на границі між рідинами й роботою когезії рідини, що розтікається. Необхідною умовою розтікання рідини A по поверхні рідини B є виконання нерівності:

$$\sigma_B \geq \sigma_A + \sigma_{A-B}. \quad (2.7)$$

При цьому інтенсивність розтікання зростає з ростом роботи адгезії й зі зменшенням роботи когезії рідини, що розтікається.

Розходження в поведженні змочувальної й незмочувальної рідин полягає в тому, що в змочувальній рідині проявляється тенденція до збільшення площі контакту із твердим тілом, а в незмочувальній – до зменшення цієї площі. Це пов'язано з тим, що в змочувальній рідині енергія, що доводиться на одиницю площі поверхневого шару, що контактує із твердим тілом, менша, ніж енергія неконтактуючого із твердим тілом поверхневого шару рідини. У незмочувальній рідині це співвідношення зворотне.

Розходження у величині поверхневої енергії, що доводиться на одиницю поверхні рідини, пов'язане з тим, що на молекулу поверхневого шару рідини крім сил притягання, що діють із боку внутрішніх її шарів, діють ще сили притягання або відштовхування з боку молекул поверхні твердого тіла. Тому результуюча сила, що діє на молекули поверхневого шару рідини, що прилягає до твердого тіла, залежно від напрямку й величини сил, що діють із боку молекул твердого тіла, може бути або менше, або більше сил, що діють на молекули поверхневого шару рідини, що не контактує із твердим тілом.

Фактори, що впливають на змочування і розтікання. Так як величина рівноважного кута змочування визначається співвідношенням значень питомих поверхневих енергій (формула 2.5), то всі фактори, що впливають на питомі поверхневі енергії контактуючих фаз, повинні впливати й на змочування твердого тіла розплавом. До таких факторів відносяться насамперед хімічний склад твердої підкладки й розплав, склад газового середовища, температура системи й хімічна взаємодія твердого тіла з розплавом, оскільки взаємодія

змінює міжфазну енергію границі розділу тверде тіло – розплав, а також поверхневий натяг розплаву внаслідок зміни хімічного складу останнього.

Зміна крайового кута змочування при зміні складу підкладки або металевому розплаву багато в чому залежить від зміни величини $\sigma_{T-ж}$, причому істотний вплив на міжфазну енергію границі розділу й змочування твердого металу розплавом має хімічна взаємодія між контактуючими фазами.

Зі зростанням температури спостерігається зниження крайового кута змочування.

Істотний вплив на змочування твердих тіл металевим розплавом має газове середовище. Цей вплив особливо помітний у тому випадку, коли на границі із застосовуваним газом відбувається істотне зниження величини поверхневого натягу металевому розплаву.

Змінити змочування твердих підкладок розплавленими металами можна й створенням вакууму. Звичайно вважають, що зі збільшенням ступеня вакуумування змочування поліпшується. Це зв'язують із видаленням оксидної плівки з поверхні твердого металу, наявність якої погіршує розтікання металевих розплавів. Крім наявності оксидної плівки на змочування твердих тіл розплавами впливає й шорсткість поверхні підкладки.

2.2 Обладнання та матеріали

Муфельна піч, установка типу УВН, штангенциркуль, висотомір, зразки алюмінію, титану, силуміну.

2.3 Хід виконання роботи

- 2.3.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.
- 2.3.2 Зачистити зразки титану наждачним папером, протравити та знежирити розчинником.
- 2.3.3 Вивести муфельну піч на потрібний режим нагріву (на 35-90 °С вище $T_{пл}$ евтектики алюміній-кремній, 600-650 °С).
- 2.3.4 Встановити пластину титану за допомогою пінцета на столик муфельної печі і витримати його на протязі 2-3 хвилин.
- 2.3.5 Покласти на поверхню зразка навіску силуміну, витримати 2-3 хвилини, слідкуючи за процесом, потім зняти зі столу зразок з припоєм і покласти на технологічну підставку для охолодження.
- 2.3.6 За допомогою штангенциркуля і висотоміра заміряти діаметр гіпотетичної сферичної каплі (D) і висоту каплі припою (H).
- 2.3.7 Використовуючи формулу (2.8) розрахувати коефіцієнт розтікання припою (у відсотках), а по графіку (рисунок 2.2) визначити кут змочування.

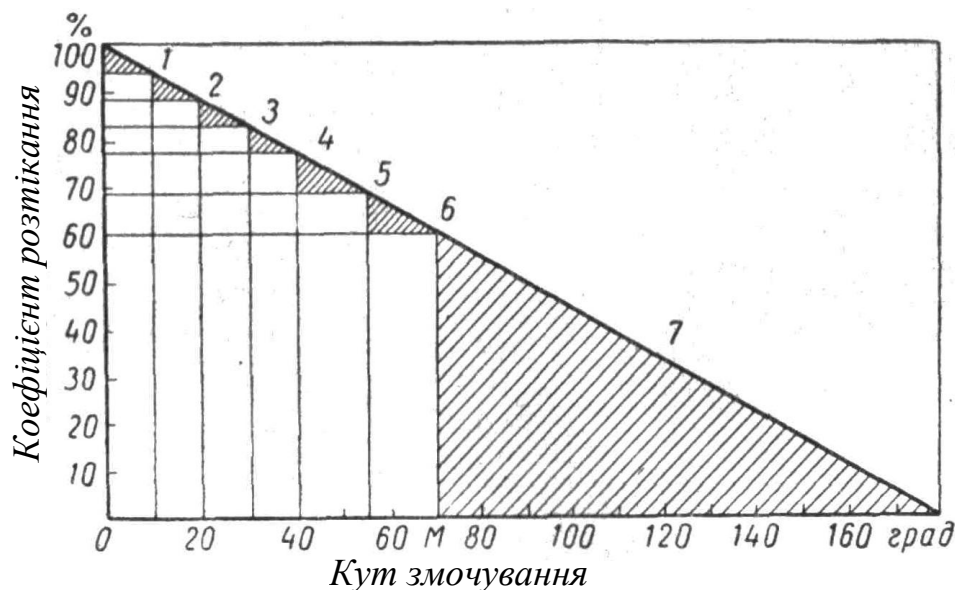
$$\gamma = \frac{D-H}{D} \times 100. \quad (2.8)$$

Діаметр каплі може також розрахувати по формулі:

$$D_k^p = \sqrt[3]{\frac{W}{\gamma} \times \left(\frac{6}{\pi}\right)}, \quad (2.9)$$

де W – маса навіски;
 γ – питома маса навіски.

2.3.8 Провести аналогічні дослідження розтікання силуміну на поверхні титану при нагріві у вакуумній камері в середовищі аргону при атмосферному тиску, і зробити відповідні розрахунки.



оцінка розтікання: 1 – ідеальне; 2 – відмінне; 3 – дуже хороше;
 4 – хороше; 5 – достатнє; 6 – задовільне; 7 – погане

Рисунок 2.2 – Залежність розтікання від кута змочування

2.4 Зміст звіту

2.4.1 Назва роботи, мета і короткі теоретичні відомості.

2.4.2 Порядок виконання роботи.

2.4.3 Результати досліджень, аналіз отриманих даних, висновки по роботі.

2.5 Контрольні запитання

2.5.1 Дати визначення поверхневого та міжфазного натягу.

2.5.2 Умова розтікання рідини по поверхні твердого тіла.

2.5.3 Охарактеризувати кут змочування.

2.5.4 Вказати фактори, що впливають на змочування і розтікання.

2.5.5 Вказати способи покращення розтікання рідини по поверхні твердого тіла.

3 Лабораторна робота №3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ НА ЗМОЧУВАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

Мета роботи: дослідити процес розтікання припою на поверхні сталюого зразку з різними параметрами шорсткості.

3.1 Короткі теоретичні відомості

Шорсткість поверхні є одним з важливих факторів якості поверхні, від якої залежить фактична площа контакту двох твердих тіл, адгезія, змочування та інше. Для процесів паяння та зварювання в твердій фазі через рідкі евтектичні прошарки важливе значення має саме змочування та вплив шорсткості поверхонь на змочування.

Розглянемо положення краплі рідини на шорсткій та рівній поверхні. Крапля на рівній поверхні симетрична відносно своєї осі (рисунок 3.1). Крайовий кут по всьому периметру краплі однаковий, а площа контакту являє собою коло радіусом r_k .

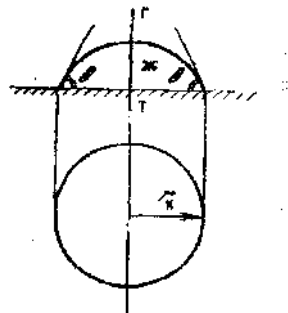


Рисунок 3.1 – Адгезія симетричної краплі на рівній, горизонтально розташованій поверхні

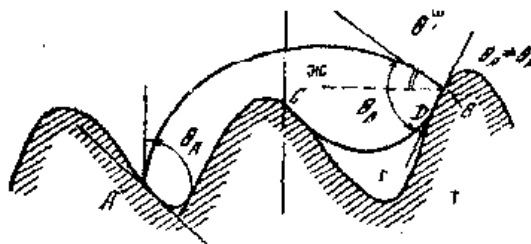


Рисунок 3.2 – Асиметрія форми краплі на шорсткій поверхні: θ_A, θ_B – істинні краєві кути; θ^{III} – крайовий кут, що вимірюється

Симетрія прилиплої краплі є скоріше виключенням, чим правилом. Для її здійснення необхідні не тільки ідеально гладкі поверхні, але й енергетично однорідні горизонтально розташовані поверхні. Шорсткість поверхні порушує симетрію краплі. Проекція краплі буде мати неправильну форму з язиками, спрямованими у бік виїмок поверхні. На шорсткій поверхні вимірюють кут нахилу сферичної краплі по відношенню до поверхні твердого тіла. Крайовий

кут на шорсткій поверхні $\theta^{\text{ш}}$ не дорівнює істинному крайовому куту. Його визначають у точці, що перебуває на лінії змочування (точка В на рисунку 3.2).

Площа контакту краплі із гладкою поверхнею:

$$S_k = \pi \cdot r_k^2. \quad (3.1)$$

Площа контакту краплі тієї ж маси на шорсткій поверхні більша в порівнянні із площею контакту на гладкій поверхні. На нерівній поверхні частина рідини буде заповнювати наявні виїмки. Збільшення площі контакту краплі на шорсткій поверхні в порівнянні із гладкою визначають за допомогою коефіцієнта:

$$R_{\Delta} = S'_k / S_k, \quad (3.2)$$

де S'_k – площа контакту краплі із шорсткою поверхнею.

У цьому визначенні коефіцієнта R_{Δ} не враховано, що проникнення рідини у виїмки (рисунк 3.2) може відбуватися лише частково. Рідина зупиниться, наприклад, на лінії CD. Тоді під лінією CD буде перебувати газ або повітря, а вище цієї лінії – рідина. Тому необхідно враховувати часткове заповнення рідиною виїмок шорсткої поверхні. Кількісно неповне змочування й заповнення виїмок шорстких поверхонь можна виразити за допомогою коефіцієнта:

$$\eta = S''_k / S'_k, \quad (3.3)$$

де S''_k – частина площі під краплею, що стикається з повітрям.

Неповне змочування відіб'ється на площі фактичного контакту рідини із шорсткою поверхнею, що можна виразити за допомогою коефіцієнта:

$$R'_{\Delta} = (S'_k - S''_k) / S_k. \quad (3.4)$$

Коефіцієнти R_{Δ} і R'_{Δ} дають можливість визначити роботу адгезії рідини на шорстких поверхнях W_{ad}^u по відношенню до роботи адгезії на гладких поверхнях W_{ad} . Зв'язок між двома видами рівноважної роботи рідини дорівнює:

$$W_{ad}^u = R'_{\Delta} \cdot W_{ad}. \quad (3.5)$$

Коефіцієнти R'_{Δ} і R_{Δ} завжди більше 1. Тому робота адгезії рідини на шорстких поверхнях перевищує роботу адгезії на гладких поверхнях.

Величина істинного крайового кута залежить від місця зіткнення краплі з поверхнею. Так, на рисунку 3.2 крайовий кут у лівій частині краплі θ_A не дорівнює крайовому куту в правій частині краплі θ_B , тобто $\theta_A \neq \theta_B$. Різні значення крайового кута однієї й тієї ж краплі називають гістерезисом. Під цим мається на увазі здатність рідини утворювати із твердим тілом кілька стійких крайових кутів, які відрізняються від рівноважного крайового кута, одержуваного на гладких і однорідних поверхнях. Гістерезис є наслідком асиметрії краплі, яка, у свою чергу, обумовлена виступами шорсткої поверхні. Гістерезис може проявлятися і на похилій поверхні.

Гістерезис змочування, викликаний шорсткістю або нахилом поверхні, називають статичним. Статичний гістерезис не пов'язаний з переміщенням крапель і практично не залежить від часу контакту рідини з поверхнею. Він може бути викликаний не тільки шорсткістю й нахилом поверхні, але й іншими причинами, наприклад, наявністю забруднень, енергетичною неоднорідністю поверхні. Крім статичного має місце кінетичний гістерезис змочування. Він пов'язаний з розтіканням рідини й характеризується зміною крайових кутів залежно від часу контакту рідини.

Таким чином, нерівності впливають на адгезію рідини. Вони змінюють площу контакту, роботу адгезії й значення крайових кутів, а також викликають гістерезис. Шорсткість впливає на рух рідини й на її скочування з похилих поверхонь.

3.2 Обладнання та матеріали

Муфельна піч, штангенциркуль, висотомір, зразки із сталі, олово.

3.3 Порядок виконання роботи

- 3.3.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.
- 3.3.2 Підготувати поверхні сталевих зразків з різними параметрами шорсткості, протравити та знежирити розчинником.
- 3.3.3 Вивести муфельну піч на потрібний режим нагріву (на 35-90°C вище $T_{пл}$ олова, 450-500°C).
- 3.3.4 Встановити сталеві зразки на столик муфельної печі і витримати його протягом 2-3 хвилин.
- 3.3.5 Покласти на поверхні зразків навіску з олова, витримати 2-3 хвилини, слідкуючи за процесом, потім зняти зі столу зразок і покласти на технологічну підставку для охолодження.
- 3.3.6 За допомогою штангенциркуля і висотоміра заміряти діаметр гіпотетичної сферичної краплі (D) і висоту краплі припою (H).
- 3.3.7 Використовуючи формулу (2.8), розрахувати коефіцієнт розтікання припою (у відсотках), а по графіку (рисунок 2.2) визначити кут змочування.

3.4 Зміст звіту

- 3.4.1 Назва роботи, мета та короткі теоретичні відомості.
- 3.4.2 Результати випробувань.
- 3.4.3 Висновки по роботі.

3.5 Контрольні запитання

- 3.5.1 Параметри шорсткості.
- 3.5.2 Адгезія краплі на гладкій поверхні.
- 3.5.3 Зв'язок роботи адгезії рідини на жорсткій та рівній поверхні.
- 3.5.4 Гістерезис змочування і асиметрія краплі.
- 3.5.5 Статистичний і кінетичний гістерезис змочування.

4 Лабораторна робота № 4

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИХ ЯВИЩ

Мета роботи: дослідити процеси виникнення термоелектрорушійної сили при нагріві контакту різних металів.

4.1 Короткі теоретичні відомості

Встановлено існування стрибка потенціалу на поверхні металу. Електрони, що володіють достатнім запасом кінетичної енергії, вириваються з металу й утворюють над його поверхнею негативно заряджену хмару. Електрони, що перебувають усередині металу й поблизу його поверхні, відштовхуються від цієї хмари і вштовхуються усередину металу. При цьому зменшується поверхнева щільність електронів, тобто індукується позитивний заряд, рівний по абсолютній величині негативному заряду електронної хмари. Сила взаємодії між зарядами – сила електричного зображення – має значну дальність дії, до 10 мкм від поверхні. Тому електричний потенціал поверхні характеризується потенціалом зовнішнього простору на відстані приблизно 10 мкм від поверхні. Хмара електронів разом із зовнішнім шаром позитивних іонів утворює подвійний електричний шар.

Внутрішній електрон металу можна розглядати як такий, що перебуває на певному рівні в потенційній ямі з енергетичною глибиною E_0 . При температурі абсолютного нуля вільні електрони, підкоряючись квантовій статистиці, мають мінімальну енергію й займають нижні рівні, на кожному з яких, за принципом Паулі, не може бути більше двох електронів, що відрізняються своїми спінами (потенціал поля усередині металу передбачається постійним). Якщо найбільш високий рівень відповідає енергії E_1 (рівень Фермі) (рисунок 4.1), то енергія, необхідна для виривання електрона з металу, дорівнює $\psi = E_0 - E_1$, де ψ – енергія виходу електрона. Надати енергію ψ можливо за допомогою удару частки, що швидко летить, і нагрівання металевої системи.

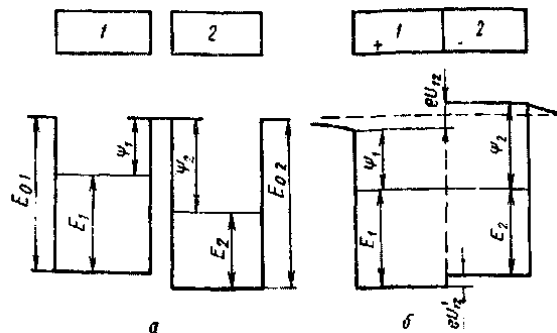


Рисунок 4.1 – Контакт двох металів з різними рівнями Фермі

Якщо електрони переходять у вакуум, то зазвичай говорять про емісії електронів. При переході електронів (дірок) з одного тіла в інше прийнято

говорити про контактні явища. Якщо контактуючі метали мають різну роботу виходу електронів (РВЕ), то відбувається перерозподіл електронів до рівноважного стану. При цьому один метал заряджається відносно іншого. Різниця потенціалів між ними називається контактною різницею потенціалів.

При контактуванні металу 1 (рисунок 4.1), що володіє енергією виходу ψ_1 з металом 2, що володіє енергією виходу ψ_2 , електрони з найвищих рівнів металу переходять на більш низькі вільні рівні металу 2. У статистичній фізиці доводиться, що умовою рівноваги між дотичними металами є рівність повних енергій, що відповідають рівням Фермі. Таким чином, в обох металах виникає загальний рівень Фермі. Потенціальна енергія електрона в безпосередній близькості до поверхні першого металу $\psi_1 - \psi_2$. Потенціал на поверхні першого металу на $U_{12} = \frac{1}{e} (\psi_2 - \psi_1)$ вище, ніж на поверхні другого (U_{12} – зовнішня контактна різниця потенціалів; e – заряд електрона).

Потенціальна енергія електрона в металі 1 менша, ніж у металі 2 на $E_1 - E_2$, отже, потенціал (що має знак мінус через заперечність заряду електрона) усередині металу 1 вищий, ніж усередині металу 2. Тоді внутрішню контактну різницю потенціалів можна визначити по формулі 4.1:

$$U_{12} = \psi_1 - \psi_2 \quad (4.1)$$

При $\psi_1 = \psi_2$ контактна різниця потенціалів можлива при розбіжності концентрації вільних електронів у металах.

При нагріванні контакту різнорідних металів внаслідок того, що рівні Фермі залежать від температури й концентрації вільних електронів, виникає термоелектрорушійна сила (ЕРС).

$$\varepsilon = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_2}{n_1} \quad (4.2)$$

де n_1 , і n_2 – концентрації електронів провідності;

$T_1 - T_2$ – різниця температур гарячого й холодного спаїв.

Градiєнт температури викликає дифузiю бiльш швидких електронiв до холодного кiнця, а бiльше повiльних – до теплого.

Контактна різниця потенціалів лежить в основі електризації металів при їхньому взаємному зіткненні, взаємному ковзанні, ударі.

Те, що при контакті відбувається перерозподіл електронної щільності, на підставі теорії Френкеля дозволяє припустити, що змінюється величина поверхневої енергії. З аналізу різних напівемпіричних формул можна припустити, що чим більша електронна концентрація (у металу з більшою роботою виходу), тим більша величина поверхневої енергії. Для пояснення цього можна використати теорію вільних електронів. Метал розглядається у вигляді тривимірної потенціальної ями. Поверхня кристала є потенціальним бар'єром, на який діє тиск електронного газу. Відриваючись від поверхні,

електрони провідності передають їй імпульс, внаслідок чого іони поверхні мають підвищену енергію. Величина електронного внеску в поверхневу енергію пропорційна величині енергетичного бар'єра, на якому відбувається розсіювання.

Поверхнева енергія на границі контакту двох металів зосереджена в металі, що має більшу величину роботи виходу електронів (РВЕ), у той час як поверхнева енергія металу з меншою роботою виходу різко знижується.

4.2 Обладнання та матеріали

Муфельна піч, спаї різнорідних металів, мілівольтметр.

4.3 Порядок виконання роботи

- 4.3.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.
- 4.3.2 Підключити спай різнорідних металів (хромель-алюмель, хромель-копель, або інший) до мілівольтметра.
- 4.3.3 Вставити спай в спеціальний отвір муфельної печі.
- 4.3.4 Включити муфельну піч та нагрівати її до 600-900 °С в залежності від використовуваного спаю, проводячи заміри показань мілівольтметра з кроком 50 °С.
- 4.3.5 Отримані експериментальні дані представити у вигляді таблиці.
- 4.3.6 Побудувати графік залежності термо-ЕРС від температури нагріву контакту різнорідних металів.

4.4 Зміст звіту

- 4.4.1. Назва роботи, мета і короткі теоретичні відомості.
- 4.4.2. Результати дослідів (таблиці і рисунки).
- 4.4.3. Висновки по роботі.

4.5 Контрольні запитання

- 4.5.1 Робота виходу електронів.
- 4.5.2 Механізм створення подвійного електричного шару.
- 4.5.3 Природа виникнення контактної різниці потенціалів.
- 4.5.4 Типові приклади використання контактної різниці потенціалів.
- 4.5.5 Механізм виникнення термо-ЕРС при нагріві контакту різнорідних металів.

5 Лабораторна робота №5

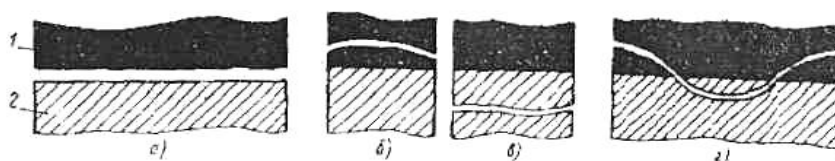
ОСНОВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ АДГЕЗІЇ

Мета роботи: ознайомитись з основними методами контролю адгезії

5.1 Короткі теоретичні відомості

Адгезія (від лат. adhaesio – прилипання) – зчеплення двох різнорідних тіл, приведених у зіткнення. В окремому випадку тіл однакової фізико-хімічної природи теж саме явище називається *когезією*. Адгезія обумовлена міжатомним (міжмолекулярним) притяжінням, природа якого пов'язана з деформацією електронних оболонок атомів на границі поділу тіл (поляризаційна, зокрема взаємодія Ван-дер-Ваальса) і (або) з переходами валентних електронів цих атомів (хімічна взаємодія). Високу адгезійну міцність проявляють контакти металів з багатьма (хоча й не всіма) металами й напівпровідниками, а також контакти полімерних плівок з різними матеріалами; набагато нижча міцність контактів металів з діелектриками й графітом. Адгезія відіграє важливу роль у ряді явищ на границі поділу: терті, змочуванні. Адгезія знаходить практичне застосування при пайці, зварюванні, склеюванні, вирощуванні монокристалів.

Сукупність методів виміру зусиль відриву або ковзання для визначення міцності адгезії називається адгезіометрією, а прилади, призначені для виміру величини адгезії, називаються адгезіометрами. Величина адгезії вимірюється силою або роботою відриву на одиницю площі контакту. Крім величини адгезії, система адгезив-субстрат характеризується видом руйнування зв'язку. Існують три види руйнування зв'язку: адгезійне (рисунок 5.1, а), когезійне (рисунок 5.1, б, в), змішане (рисунок 5.1, г). Адгезійне руйнування відбувається у випадку, коли адгезив цілком відділяється від субстрату, когезійне – коли руйнування відбувається по масиву адгезива або субстрату, і змішане – частково по адгезиву, частково по субстрату.



1 – адгезив; 2 – субстрат

Рисунок 5.1 – Види руйнування адгезійних з'єднань

По способу порушення адгезійного зв'язку є методи виміру адгезії: рівномірного відриву; нерівномірного відриву; зрушення. За характером прикладеного навантаження методи підрозділяються на статичні й динамічні. Ця класифікація є умовною, оскільки, як відомо, напруги у випадку прикладання розтягуючого або зрушуючого навантаження розподіляються нерівномірно, а, отже, як розрив, так і зрушення не можуть бути отримані в

чистому виді. Застосовувані на практиці методи рівномірного й нерівномірного відриву й зрушення є, як правило, статичними. Однак у ряді випадків застосовуються не статичні навантаження, а динамічні – ударні, пульсуючі, вібраційні.

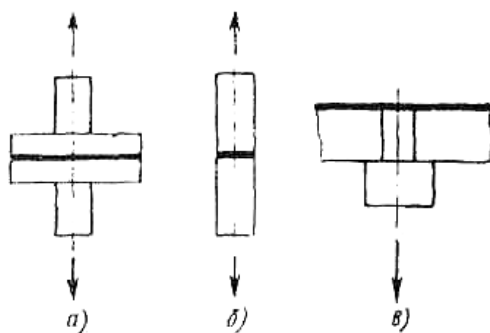


Рисунок 5.2 – Зразки для визначення адгезії методом рівномірного відриву

Методом рівномірного відриву вимірюють величину зусилля, прикладеного по нормалі до площини шва. Зразки для визначення адгезії можуть мати різну форму, наприклад, форму грибків (рисунок 5.2, а), циліндрів (рисунок 5.2, б), штифтів (рисунок 5.2, в). Випробування проводяться на розривній машині малої потужності, сила відриву вимірюється чутливим динамометром або за допомогою електроперетворювачів із записом на стрічку потенціометра.

Сутність методу нерівномірного відриву полягає в тому, що сила відриву прикладається не по осі симетрії шва, а по одному із країв, у зв'язку із чим зв'язок порушується поступово. Розрізняють схеми випробувань на відшаровування твердих матеріалів (рисунок 5.3) і гнучких матеріалів (рисунок 5.4). Поділ двох гнучких матеріалів прийнято називати розшаровуванням, а відділення гнучкого матеріалу від твердого – відшаровуванням.

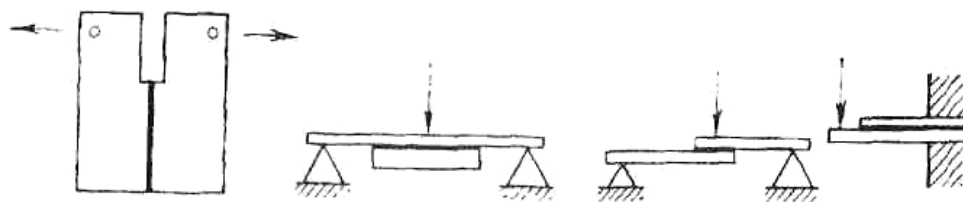


Рисунок 5.3 – Схеми випробувань на відшарування твердих матеріалів

Метод виміру адгезії зрушенням широко застосовується для адгезивів і матеріалів різної природи. Випробування можуть проводитися шляхом прикладання розтягуючого (рисунок 5.5, а), стискаючого (рисунок 5.5, б) і крутного (рисунок 5.5, в) навантаження.

Для виміру адгезії статичним методом широко застосовуються звичайні силовимірювачі по типу розривних машин. Зразки, які випробовуються, фіксуються в затисках, і із задалегідь обраною швидкістю прикладається навантаження. Розтягуюче, стискаюче або зусилля, що зрушує, записується на

стрічку самописа або контролюється візуально по вимірювальній шкалі динамометра. Істотний недолік цього методу – низька чутливість і висока інерційність вимірювальної системи. У випадку малої адгезії ця система виміру взагалі непридатна. Широко застосовуються електричні методи виміру зусилля. Результати записуються на стрічку потенціометра, а у випадку динамічного впливу навантаження – на стрічку шлейфового осцилографа. Розтягуюче, стискаюче або зрушуюче зусилля може бути прикладене за допомогою механізму будь-якого принципу дії – механічного, гідравлічного, пневматичного і т.д. Перевагу віддають гідравлічним навантажувачам, що забезпечують повільне прикладання зусилля з регульованою швидкістю.

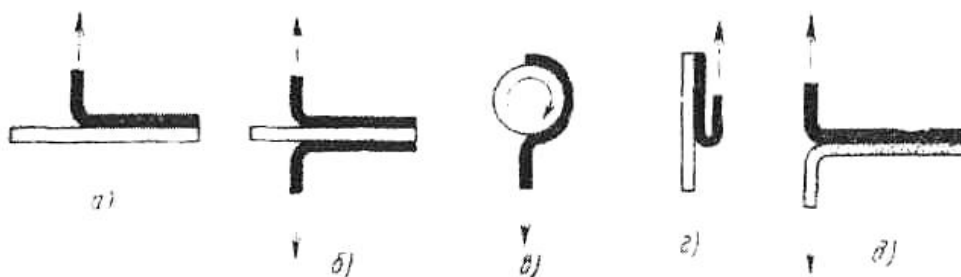


Рисунок 5.4 – Схеми випробувань на відшарування гнучких матеріалів від твердої основи під кутом 90° (а,б,в) і 160° (г) та на розшарування гнучких матеріалів (д)

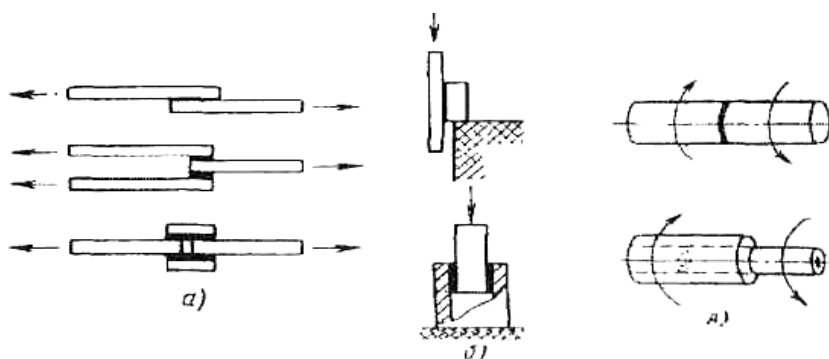


Рисунок 5.5 – Схеми випробувань на зрушення

5.2 Обладнання та матеріали

Лабораторна установка для визначення міцності зварних з'єднань; лупа; зварні зразки твердих матеріалів, отримані дифузійним зварюванням та за допомогою склеювання; пластини матеріалів, що зварюються (Cu, Mo, Cr і ін.).

5.3 Порядок виконання роботи

5.3.1 Ознайомитись з правилами техніки безпеки.

5.3.2 Методом випробування на відшарування (на згин) визначити міцність зчеплення зварних та клеєних з'єднань та міцність самих матеріалів.

5.3.3 Провести необхідні розрахунки для визначення числового значення міцності.

5.3.4 За допомогою лупи встановити вид руйнування зв'язку.

5.3.5 Результати випробувань занести в таблицю:

№ випробування	З'єднувальні матеріали	Спосіб з'єднання	Міцність зчеплення, МПа	Міцність матеріалів, МПа	Вид руйнування

5.4 Зміст звіту

5.4.1 Назва роботи, мета та короткі теоретичні відомості.

5.4.2 Результати випробувань.

5.4.3 Висновки по роботі.

5.5 Контрольні запитання

5.5.1 Що таке адгезія?

5.5.2 Сили, що викликають адгезію.

5.5.3 Види руйнування зв'язку.

5.5.4 Основні методи контролю адгезії.

5.5.5 Практичне значення адгезії.

6 Лабораторна робота №6

ОСНОВНІ МЕТОДИ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНІ

Мета роботи: ознайомитись з основними методами видалення поверхневих плівок з поверхні металів.

6.1 Короткі теоретичні відомості

Більшість металів є хімічно активними, що створює серйозні складнощі при видаленні з поверхонь, що зварюються, інородніх шарів, які заважають утворенню нероз'ємних з'єднань.

Поняття чистої поверхні умовне, тому що отримання металевої поверхні ідеальної чистоти представляє собою задачу, яку неможливо вирішити. Причиною забруднення є контакт із зовнішнім середовищем та дифузією домішок із об'єму металу.

Вибір методу підготовки поверхонь залежить від властивостей металів, що зварюються, від способу зварювання та вимог, що пред'являються до якості поверхонь при структурних дослідженнях металів та при зварюванні в твердій фазі.

Поверхні металів, підготовлених методами механічного, плазменевого, газоплазменевого або електроіскрового різання, піддаються очищенню перед розміщенням зразків у вакуумній камері для структурних досліджень або дифузійного зварювання. Найчастіше попередня обробка складається з механічного, електролітичного або хімічного полірування. Залежно від природи металу й вихідного стану поверхні застосовують або один із зазначених способів очищення, або їхню комбінацію. Наприклад, для благородних металів досить механічного полірування. Для хімічно активних металів після механічного полірування проводять електро- або хімічне полірування.

Для механічного полірування використовують, як правило, алмазні пасти з розміром часток 0,1-1 мкм або пасти на основі Al_2O_3 із розміром часток 0,05-0,3 мкм.

Хімічне полірування може здійснюватися в киплячій царській горілці, а електрополірування – у розчинах $NaOH$; 90% H_2SO_4 – 10% HF ; 60% HCl – 40% C_2H_5OH ; 50% H_3PO_4 – 20% H_2O – 30% C_2H_5OH при щільності струму від 1 до 50 $ма \cdot див^{-2}$.

Чистого або атомно-чистого стану поверхні металевого монокристала можна досягти, видаляючи у вакуумі сторонні атоми або молекули з поверхні зразка. Основними методами вакуумного очищення є: високотемпературна обробка (ВТО), метод хімічних реакцій (ХР) та іонне бомбардування (ІБ).

При методі ВТО зразок нагрівається до таких температур, при яких забезпечується десорбція у вакуумі атомів домішок з поверхні або з об'єму кристала. Температура нагрівання зразка та час витримки залежать від аналізованого металу і природи домішки, яку видаляємо, і підбираються

дослідним шляхом. Максимальна температура $T_{\text{мак}}$, необхідна для дегазації металу, визначається залежністю:

$$T_{\text{мак}} \approx 4,77 \cdot 10^{-3} \Delta H, \quad (6.1)$$

де ΔH – енергія зв'язку атомів адсорбованого газу ($\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$).

Для ряду металів $T_{\text{мак}} < T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ – температура плавлення). Однак для багатьох систем метал-газ, зокрема метал-кисень, $T_{\text{мак}} \geq T_{\text{пл}}$, отже, метод ВТО неприйнятний.

Метод ВТО, як остаточне очищення, застосовують для обмеженого кола матеріалів, в основному тугоплавких металів (Mo, W, Re, Ta й ін.). Їх нагрівають до температур 2200...2500 К протягом проміжку часу від секунд до десятків годин залежно від вихідної чистоти. Ціль тривалого високотемпературного прогріву полягає у видаленні домішок, що дифундують на поверхню з об'єму кристала. Основними домішками більшості перехідних металів є вуглець, сірка, а також кисень і хлор.

Метод обмежено застосовується для речовин з низькою температурою плавлення ($T_{\text{пл}} < 1000$ °С). Крім того, при високих температурах істотно змінюється розподіл домішок і дефектів у зразку. Ряд домішок, дифундуючи на поверхню, взаємодіє із залишковими газами і може утворити нелетучі поверхневі сполуки.

Метод ХР полягає в прогріві зразка в спеціально підібраному газовому середовищі низького тиску до відповідної температури, що стимулює протікання між домішками й газовим середовищем хімічної реакції, продукти якого при цьому легко видаляються прогрівом. У цьому способі температура значно нижче, ніж у попередньому способі, що зменшує ступінь забруднення поверхні домішками, що дифундують із об'єму кристала. Для реалізації ХР необхідно знати склад домішок, що видаляють, і вибрати відповідне газове середовище. Найчастіше використовують активні гази, які взаємодіють з різними домішками по типу реакцій окислювання - відновлення. Летучі продукти окислювання утворюються при відпалі матеріалу в середовищі кисню, а відновлююча обробка проводиться в атмосфері водню. Іноді застосовують оксид вуглецю, пари йоду. Тиск активного газу підтримується в межах 10^{-4} ... 10^{-5} Па.

Метод ІБ полягає в обробці поверхні зразка іонами інертних газів. Фізичною основою методу є процеси катодного розпилення. На відміну від інших способів очищення, які діють вибірково, ІБ ефективно видаляє будь-які домішки: атоми елементів, жири, адсорбовані воду й гази, шари оксидів, карбідів, нітридів і т.п. Однак ІБ може викликати небажані побічні явища, зокрема порушення кристалічної структури поверхні й приповерхнього шару, втискання іонів у решітку. Тому для одержання атомно-чистої або чистої поверхні чередують кілька циклів іонного бомбардування з наступним низькотемпературним відпалом, необхідним для усунення структурних порушень, що виникають при ІБ.

При ІБ видаляються всі поверхневі домішки й кілька верхніх шарів решітки вихідної речовини. Для відпалу виникаючих при бомбардуванні дефектів і видалення атомів інертного газу здійснюють наступне високотемпературне нагрівання зразків.

Метод ІБ здійснюють за допомогою пучка іонів при напуску робочого газу (звичайно аргону, криптону) у камеру зі зразком або пучком іонів, формованих самостійною іонною гарматою. Основними параметрами ІБ є щільність струму іонів, що бомбардують, і час обробки. При їхньому підборі враховують попередній стан поверхні кристала і тиск залишкових газів у камері.

Метод холодної емісії полягає у видаленні поверхневих атомів з вістря при високій напруженості електричного поля. На екрані іонного проектора при цьому можна спостерігати дифракційну картину поверхні. Основний недолік методу – мізерно мала величина очищеної поверхні.

Метод розколу у вакуумі застосуємо до напівпровідникових і діелектричних кристалів. Він майже не приводить до ефектів, пов'язаних із високотемпературними нагріваннями зразка. Однак при розколюванні виділяється невелика кількість розчиненого в об'ємі газу, що у випадку малої поверхні монокристала може привести до істотного забруднення його поверхні. Тому перед розколом зразок необхідно тривалий час тренувати при високих температурах, що, звичайно, приводить до зміни розподілу дефектів у його об'ємі.

Свіжоприготована поверхня може досить довго зберігатися зовсім чистою лише в умовах глибокого вакууму. Залишковий тиск не повинен перевищувати 10^{-10} мм рт. ст.

6.2 Обладнання та матеріали

Установка для дифузійного зварювання у вакуумі типу УВМ; мідні зразки; цифровий фотоапарат; оптичний мікроскоп.

6.3 Порядок виконання роботи

- 6.1.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.
- 6.1.2 Підготувати поверхню мідного зразка шляхом механічного полірування.
- 6.1.3 Дослідити поверхню на оптичному мікроскопі.
- 6.1.4 Провести вакуумну високотемпературну обробку мідного зразка. Перед початком роботи потрібно перевірити правильність вихідного положення всіх рукояток і перемикачів установки, відсутність зовнішніх пошкоджень. Включити електроживлення і водопостачання установки холодною водою, проконтролювати при цьому тиск води по манометру. Увімкнувши механічний насос, увімкнути термопарний вакуумметр і відкачати паромасляним насосом до тиску 1,33 Па. Увімкнути електронагрівач паромасляного насосу і прогріти його протягом 10 хвилин. Натікачем напустити повітря під ковпак. За допомогою

гідроприводу підняти ковпак. Встановити заготівки. Опустити ковпак. При вакуумі в робочій камері не більше $6,65 \cdot 10^{-3}$ Па подати холодну воду на ковпак і провести відпал зразка, для чого плавно збільшувати прохідний струм через випарник, довівши його до величини на 20-30 А більшої, ніж потрібно для технологічної операції; при цьому постійно слідкувати за вакуумом в робочій камері, не допускаючи його падіння нижче, ніж $11,97 \cdot 10^{-3}$ Па. Витримати випарник в цьому режимі, після цього увімкнути струм, який проходить через випарник. Закрити затвор, увімкнути іонізаційний вакуумметр. Вентилем-натікачем напустити повітря в робочу камеру. Підняти ковпак, зняти охолоджений зразок.

Увага! *Інколи в виробничих умовах виникає необхідність аварійного відключення установки. У випадку відключення електроенергії потрібно перекрити канали, які ведуть до механічного насосу і напустити в нього повітря, потім закрити затвор і виключити електромагнітні пуски електроживлення установки. При відключенні холодної води в першу чергу необхідно відключити нагрівач паромасляного насосу, а потім діяти так, як при загальному відключенні установки, але обов'язково проконтролювати перед відключенням механічного насосу достатню ступінь охолодження паромасляника. При аварійному прориві атмосфери під ковпак під час відкачки робочої камери паромасляним насосом необхідно перш за все закрити високовакуумний затвір, а потім діяти як і в попередньому випадку.*

- 6.1.5 Дослідити поверхню мідного зразка на оптичному мікроскопі (замалювати топографію зразка або зробити зйомку цифровим апаратом).
- 6.1.6 Порівняти топографію зразка після механічного полірування та після вакуумної очистки.

6.4 Зміст звіту

- 6.1.7 Назва роботи, мета та короткі теоретичні відомості.
- 6.1.8 Порядок виконання роботи.
- 6.1.9 Результати досліджень, аналіз отриманих даних, висновки по роботі.

6.5 Контрольні запитання

- 6.1.10 Причини забруднень поверхонь металів.
- 6.1.11 Способи попередньої підготовки поверхонь.
- 6.1.12 Способи отримання атомно-чистої поверхні.
- 6.1.13 Вакуумне очищення поверхонь високотемпературним нагрівом та методом хімічних реакцій.
- 6.1.14 Іонне бомбардування.

7 Лабораторна робота №7

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ СТАНУ ПОВЕРХНІ НА КОНТАКТНИЙ ОПІР

Мета роботи: дослідити залежність контактного опору сталевих та алюмінієвих заготовок від стану їх поверхонь.

7.1 Короткі теоретичні відомості

При електроконтактному зварюванні кількість тепла, що виділяється, згідно закону Джоуля-Ленца, залежить від сили струму, що проходить через метал, опору ділянки та часу проходження струму. В холодному стані загальний опір при зварюванні залежить від контактних опорів: електрод-деталь та деталь-деталь.

Контактні опори двох деталей залежить від чистоти поверхні та від зусилля, що прикладається до деталей. Наприклад, опір двох пластин низьковуглецевої сталі товщиною 3×3 мм зусиллям 200 кгс ($\approx 2 \cdot 10^3$ Н) по схемі точкового зварювання складає: при зачищенні поверхні зразків наждачним кругом 100 мкОм; обробці різцем 1200 мкОм; при наявності бриг і окалини на поверхні 80000 мкОм.

Особливе значення має стан поверхні алюмінієвих зварних зразків, у зв'язку з наявністю тугоплавкої оксидної плівки Al_2O_3 . При електроконтактному зварюванні алюмінієвих сплавів необхідно забезпечувати невеликий і за можливості постійний електроопір шару оксидів на поверхні виробів: при зварюванні на машинах змінного струму – 100-300 мкОм, при використанні енергії конденсатів – менше 100 мкОм.

Тому для алюмінієвих заготовок рекомендується травлення у водному розчині концентрованої ортофосфорної кислоти (H_3PO_4) з додаванням 0,1-0,3% хромпіка ($K_2Cr_2O_7$). Тривалість травлення 10-15 хвилин, далі сушіння гарячим повітрям ($T = 70 \div 80^\circ C$). Після травлення допускається зберігання деталей перед зварювання до 3-х діб при використанні машин змінного струму і до 24 годин при конденсаторному зварюванні.

Для контролю якості поверхні деталі затискають між електродами спеціального пресу або точкової машини і вимірюють контактний опір мікрометром типу М246 або іншими приладами, призначеними для вимірювання малих опорів.

Стан поверхні деталей з алюмінієвих сплавів контролюють вимірюванням контактного електроопору і при інших технологічних процесах (при нанесенні покриттів, при механічних способах отримання електроконтактів та інших).

Електричний опір контактів різних металів залежить також і від зусилля їх стискання. Зі збільшенням зусилля збільшується пластична деформація виступів та руйнування оксидних плівок, росте площа і число ділянок контакту, що приводить до зменшення контактного електроопору.

7.2 Обладнання та матеріали

Машина для точкового зварювання МТ-1216; пластини зі сталі та алюмінію; мікроомметр; наждачний папір; розчин ортофосфорної кислоти; пінцет.

7.3 Порядок виконання роботи

- 7.3.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.
- 7.3.2 Підготувати сталеві та алюмінієві зразки за допомогою наждачного паперу та хімічного травлення.
- 7.3.3 Сталеві пластини з різною підготовкою поверхонь: після шліфування, після травлення та з забрудненою поверхнею попарно встановити між електродами машини для точкового зварювання і провести заміри електричного опору мікроомметром. При цьому зусилля на електродах у всіх випадках повинно бути однаковим.
- 7.3.4 Пункт 7.3.3 повторити для пластин з алюмінію.
- 7.3.5 Для сталевих пластин з забрудненою поверхнею провести вимірювання електроопору, змінюючи зусилля на електродах.
- 7.3.6 Результати досліджень представити у вигляді таблиці. Побудувати графік залежності електроопору від зусилля стискання.

7.4 Зміст звіту

- 7.4.1 Назва роботи, мета та короткі теоретичні відомості.
- 7.4.2 Порядок виконання роботи.
- 7.4.3 Результати досліджень, аналіз отриманих даних, висновки по роботі.

7.5 Контрольні запитання

- 7.5.1 Характеристика процесу нагріву металу струмом, що проходить через нього.
- 7.5.2 Вплив контактних опорів металу на процес тепловиділення при контактному зварюванні.
- 7.5.3 Фізико-хімічні та механічні властивості оксидів.
- 7.5.4 Способи підготовки поверхонь з метою зменшення контактного опору.
- 7.5.5 Вплив зусилля стискання на контактний електричний опір.

8 Лабораторна робота №8

АБРАЗИВНЕ ЗНОШУВАННЯ

Мета роботи: вивчити вплив розміру абразивних частинок та навантаження на швидкість абразивного зношування.

8.1 Короткі теоретичні відомості

Зношування – процес відділення матеріалу з поверхні твердого тіла та (або) збільшення його залишкової деформації при терті, що проявляється у поступовій зміні розмірів та (або) форми тіла.

Знос – результат зношування, визначається у встановлених одиницях.

Швидкість зношування – відношення значення зносу до інтервалу часу, протягом якого він виник.

Зносостійкість – властивість матеріалу проявляти опір зношуванню в певних умовах тертя, що оцінюється величиною, зворотною до швидкості зношування або інтенсивності зношування.

Абразивним матеріалом називається мінерал штучного або природного походження, зерна якого мають достатню твердість і мають властивість різати (дряпати).

Абразивне зношування – це руйнування поверхні деталі в результаті її взаємодії з твердими частками. У ролі таких часток виступають:

- нерухомо закріплені тверді зерна (наприклад, шанжирування твердими частинками м'яких антифрикційних матеріалів).
- незакріплені частки, що входять у контакт із поверхнею деталі (копати землю). Наприклад, насипні вантажі при їхньому транспортуванні, абразивні частки в ґрунті при роботі машин, що оброблюють ґрунт.
- вільні абразивні частки, що втягуються в потік рідиною або газом (гідроабразивне або газоабразивне зношування).
- вільні частки в зазорі пари тертя.

Під абразивне зношування підпадають деталі сільськогосподарських, будівельних, гірничих, транспортних та транспортуючих пристроїв, вузли металургійного обладнання, труби та насоси земснарядів та інших.

На процес абразивного зношування впливає природа абразивних частинок, властивості зношувальних поверхонь, величина навантаження на пару тертя та інші фактори. Загальним для абразивного зношування є механічний характер руйнування поверхні.

Абразивні частки відрізняються і характеризуються розміром, формою, твердістю.

Якщо твердість абразивного матеріалу нижче, ніж твердого металу, то знос не залежить від різниці твердості і швидко зменшується з підвищенням у такій різниці. Якщо твердість абразиву значно перевищує твердість металу, то знос

не залежить від різниці твердості. Якщо ж метал по твердості досягає хоча б 60% від твердості абразиву, то знос його різко сповільнюється.

Якщо для металів застосовують свої методи і міри твердості (по Брюнелю, Роквелу і т.д.), то для абразивних часток (мінералів) твердість вимірюють по шкалі Мооса. Найбільш м'який матеріал тальк – 1, алмаз – 10, корунд – 9, кварц – 7.

Абразивні частки збільшують знос як у підшипниках ковзання, так і кочення. Абразивні частки не впливають істотно на роботу гумових підшипників. Гума не дозволяє частці створювати в зазорі високий тиск, і сталевий вал може тільки поліруватися. Гумові підшипники можуть працювати тільки при змащенні водою, а зі збільшенням частоти обертання валу коефіцієнт тертя підшипників знижується. Знос пластмасових підшипників з абразивними частками в 5 разів менше, ніж сталевих.

8.2 Обладнання та матеріали

Лабораторна установка на базі плоскошліфувального верстату (рис. 8.1), зразки зі сталі; наждачний папір, набір важелів, аналітичні ваги.

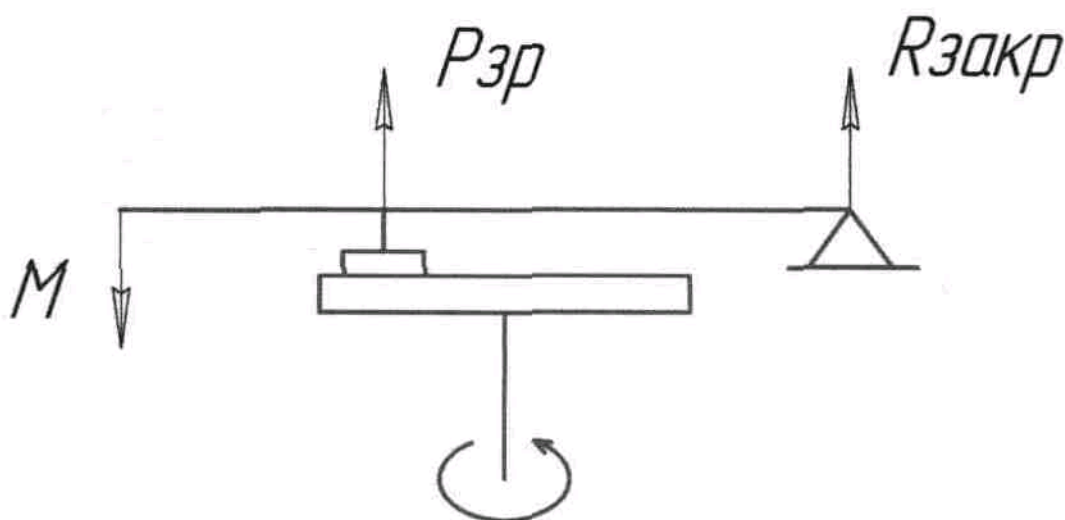


Рисунок 8.1 – Схема навантаження зразків

8.3 Порядок виконання роботи

- 8.3.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.
- 8.3.2 Зважити зразки.
- 8.3.3 Провести зношування зразків під різним навантаженням та з різним розміром абразиву наждачного паперу.
- 8.3.4 Після кожного дослідження зважити зразки (час проведення дослідження – 3 хвилини).
- 8.3.5 Побудувати графік залежності швидкості зношування від навантаження для різних розмірів абразиву.

8.3.6 Побудувати графік залежності зносостійкості від навантаження для різних розмірів абразиву.

8.4 Зміст звіту

8.4.1 Назва роботи, мета та короткі теоретичні відомості.

8.4.2 Порядок виконання роботи.

8.4.3 Результати досліджень, аналіз отриманих даних, висновки по роботі.

8.5 Контрольні запитання

8.5.1 Що називається абразивним матеріалом?

8.5.2 Характеристика абразивного зносу.

8.5.3 Залежність швидкості абразивного зносу від твердості абразивних частинок.

8.5.4 Залежність швидкості абразивного зносу від розміру абразивних частинок.

8.5.5 Залежність швидкості абразивного зносу від твердості абразивних частинок.

8.5.6 Способи боротьби з абразивним зношенням.

9 Лабораторна робота №9

ВПЛИВ СЕРЕДОВИЩА НА ЗНОШУВАННЯ

Мета роботи: Вивчити вплив різних середовищ на процес зношування пари тертя.

9.1 Короткі теоретичні відомості

Процес поверхневого руйнування речовини під впливом зовнішнього середовища називається *ерозією*. У машинобудуванні під ерозією розуміють руйнування поверхні матеріалу внаслідок механічного впливу високошвидкісного потоку рідини, газу або пари. До ерозії відноситься і руйнування металів під дією електричних зарядів (оксиерозія).

Ерозійний вплив високошвидкісного потоку рідини, газу або пари містить у собі тертя суцільного потоку і його ударів об поверхню. У результаті відбувається розхитування і вимивання окремих обсягів матеріалів.

Якщо потік містить абразивні частки, то зношування стає ерозійно-абразивним.

Корозійно-механічне зношування – зношування в результаті механічної взаємодії, що супроводжується хімічною та (або) електричною взаємодією матеріалу з середовищем.

Окислювальне зношування – зношування, при якому переважає хімічна реакція матеріалу з киснем або окислюючим оточуючим середовищем.

На інтенсивність абразивного зношування значний вплив мають вологість та агресивність середовища. Так, при наявності в абразиві вологи (водопровідної води) біля 1% інтенсивність зношування збільшується в 1,2...2,7 рази.

Вчені Л.А. Юакши, І.Р. Клейс провели лабораторні дослідження на центробіжному прискорювачі з метою дослідити залежність зношування від вологості абразиву та агресивності середовища. Для дослідів застосували воду, а також слабкі розчини оцтової та щавлевої кислоти. Дослідження демонструють, що вода діє як окислювач і може привести до корозії.

При дослідженні впливу кислотності середовища на процес наводнення сталі та її зносостійкості були взяті наступні електроліти: 3%-ний розчин оцтової кислоти, 3%-ний розчин лугу (NaOH), рослинний сік, морська та прісна вода. Результати дослідів показують, що найбільш інтенсивно зношуються зразки, що змочуються 3%-ним розчином оцтової кислоти (рН = 2,5). У випадку змочування рослинним соком, морською або прісною водою (рН = 5,2...7) зношування було в межах 150...200 мг. При застосуванні 3%-ного розчину NaOH (рН = 11,5), тобто лужного середовища, зношення мінімальне (14...40 мг).

При терті сталевих зразків в кислотному середовищі (розчин оцтової кислоти) питомий вміст водню в поверхневих шарах збільшується в 4,2...4,8 разів.

При терті в лужному середовищі велика зносостійкість обумовлена відсутністю збільшення питомого вмісту водню; це можна пояснити тим, що виділений при трибохімічних процесах водень вступає в реакцію з іонами ОН з утворенням води.

Практично всі поверхні тертя сталевих і чавунних деталей містять підвищену кількість водню і, отже, піддаються водневому зношуванню при терті. Механізм водневого зношування полягає у наступному:

1. Тертя у результаті трибодеструкції матеріалів, що містять водень, створює умови для утворення дифузійно-здатного водню (атомарний стан) з мастильного матеріалу, палива, парів води, з матеріалів пари тертя.

2. Далі відбувається адсорбція водню на поверхню деталі.

3. Відбувається дифузія водню в деформований шар сталі, швидкість якої залежить від температури і напруження.

4. Водень, що дифундує, концентрується на деякій глибині від поверхні тертя, там де знаходиться максимум температури при терті.

5. Далі відбувається утворення молекул водню (H_2), питомий об'єм яких значно більше, ніж атомів водню, внаслідок чого поверхневі шари стають крихкими, що приводить до підвищеного зносу контактуючих поверхонь.

Титанові сплави також піддаються водневому зношуванню при терті (водень утворює з титаном хімічне з'єднання, що володіє високою крихкістю).

Основні методи зменшення і попередження водневого зношування:

- введення в сталь Cr, Ti, Va знижує проникнення в неї водню;
- введення в мастильний матеріал присадкових сполук, що містять хлор (хлор з'єднується з воднем, який виділяється на поверхні) знижує дифузію в деталі, що труться.
- зниження температури, швидкості ковзання і тисків, все це також зменшує насичення деталей воднем.

9.2 Обладнання та матеріали

Лабораторна установка (рис. 9.1), зразки з алюмінію, вода, розчин лугу (NaOH), набір важелів, штангенциркуль.

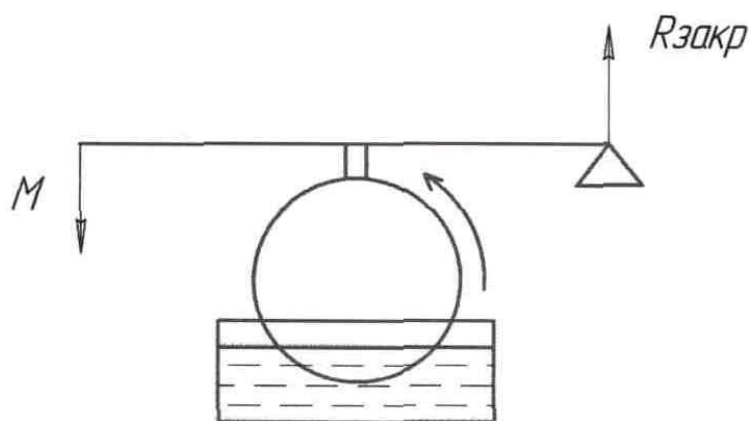


Рисунок 9.1 – Схема навантаження зразків

9.3 Порядок виконання роботи

- 9.3.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.
- 9.3.2 Провести зношування алюмінієвого зразка під різним навантаженням (830 г, 1660 г, 2490 г) без агресивного середовища (час проведення досліду – 3 хвилини).
- 9.3.3 Після кожного досліду фіксувати величину L (рис. 9.2) та розраховувати знос у одиницях об'єму.

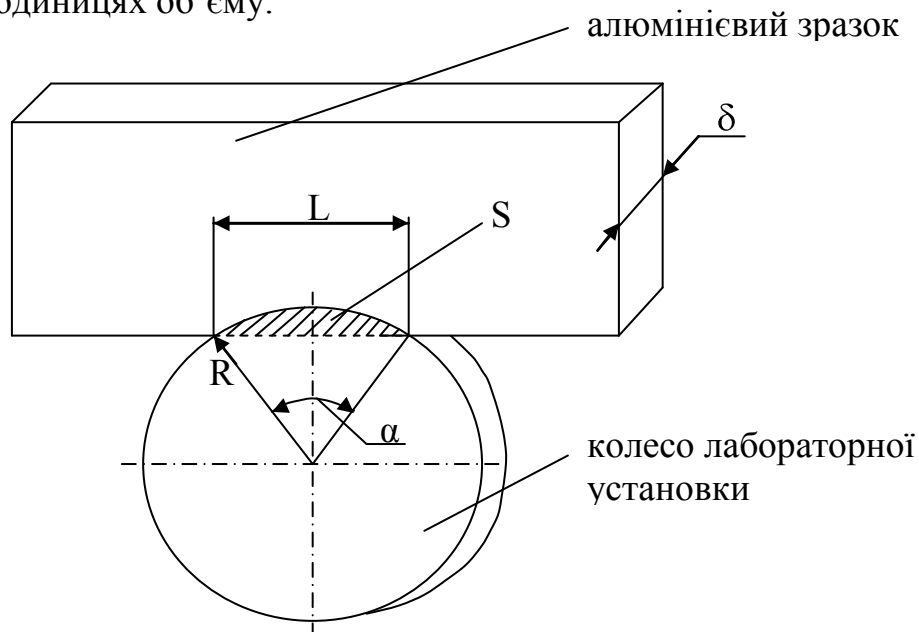


Рисунок 9.2 – Схема для розрахунку величини зносу

- 9.3.4 Виконати пункти 9.3.2, 9.3.3 у середовищі води та розчині лугу (NaOH).
- 9.3.5 Всі експериментальні та розрахункові дані занести до таблиці.
- 9.3.6 Побудувати залежність швидкості зношування від навантаження в різних середовищах.
- 9.3.7 Побудувати графіки залежності зносостійкості від навантаження в різних середовищах.
- 9.3.8 Побудувати стовбчасту діаграму зношування в різних середовищах.

9.4 Зміст звіту

- 9.4.1 Назва роботи, мета та короткі теоретичні відомості.
- 9.4.2 Порядок виконання роботи.
- 9.4.3 Результати досліджень, аналіз отриманих даних, висновки по роботі.

9.5 Контрольні запитання

- 9.5.1 Що таке ерозія?
- 9.5.2 Характеристика окислювального зношування.
- 9.5.3 Характеристика корозійно-механічного зношування.
- 9.5.4 Механізм водневого зношування сталевих та чавунних деталей.
- 9.5.5 Методи зменшення і попередження водневого зношування.

10 Лабораторна робота №10

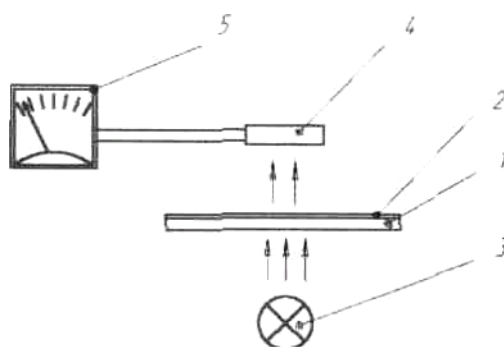
ВИЗНАЧЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТОНКИХ ПОКРИТЬ

Мета роботи: Визначити зносостійкість покрить нанесених методом металізації у вакуумі.

10.1 Короткі теоретичні відомості

Для одержання на поверхні контактуючих матеріалів зносостійких покрить існує багато способів: електрохімічне металопокриття, дифузійне насичення, газотермічне напилення, вакуумне осадження та ін. Зносостійкість таких покрить можна визначати багатьма способами, вимірюючи знос в одиницях маси, об'єму, площі, довжини та ін. Однак при визначенні зносостійкості тонких покрить звичайними способами виникають проблеми, пов'язані з неточністю вимірювань. У зв'язку з цим іноді застосовують нестандартні методики визначення зносу у відносних одиницях, що дає змогу точно оцінити якість тонких покрить. Однією з таких методик є визначення зносостійкості, фіксуючи прозорість зразка при обробці абразивом тонкого покриття, нанесеного на скляну пластинку у вакуумі.

Схема визначення прозорості показана на рисунку 3.1.



1 – скло; 2 – тонке покриття; 3 – лампа накаливання;
4 – фотоелемент; 5 – мікроамперметр

Рисунок 10.1 – Схема визначення прозорості зразка

При проведенні лабораторних робіт застосовують зразки, прозорість яких не перевищує 40% для отримання достовірних даних. Найкраще проводити досліди із зразками, прозорість яких знаходиться у межах від 10% до 90%. Слід уважно слідкувати за станом наждачного паперу на інструменті. Для отримання точних результатів рекомендується для кожного нового зразка застосовувати новий наждачний папір.

Фотодатчик на базі фотодіода ФД-163 реагує на світлове випромінювання не тільки видимого діапазону спектру, але й на інфрачервоне випромінювання. Тому для виключення помилок при визначенні прозорості зразків не можна

довго тримати ввімкнутою лампу просвічування, через те що вона, маючи велику потужність (21 Вт), нагріває зразок, що викликає похибку датчика.

10.2 Обладнання та матеріали

Лабораторна установка, набір скляних пластинок з нанесеним тонким покриттям з різних матеріалів (алюміній, мідь, хром), тонкий наждачний папір, набір важелів.

10.3 Порядок виконання роботи

- 10.3.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.
- 10.3.2 Ввімкнути установку.
- 10.3.3 Кнопкою "установка нуля" виставити прозорість на 100% по шкалі мікроамперметра при знятому зразку.
- 10.3.4 Встановити зразок і визначити його прозорість.
- 10.3.5 Провести зношування протягом 1 хвилини під заданим навантаженням.
- 10.3.6 Визначити прозорість зразка.
- 10.3.7 Повторити пункти 10.3.5, 10.3.6 необхідну кількість разів.
- 10.3.8 Побудувати графік залежності швидкості зношування від часу.
- 10.3.9 Побудувати графік залежності зносостійкості від часу.

10.4 Зміст звіту

- 10.4.1 Назва роботи, мета та короткі теоретичні відомості.
- 10.4.2 Порядок виконання роботи.
- 10.4.3 Результати досліджень, аналіз отриманих даних, висновки по роботі.

10.5 Контрольні запитання

- 10.5.1 Одиниці вимірювання зносу.
- 10.5.2 Основні методики визначення зносостійкості.
- 10.5.3 Способи створення тонких покриттів.
- 10.5.4 Вплив товщини покриття та його зносостійкість.
- 10.5.5 Механізм зношування тонких покриттів.

11 Лабораторна робота №11

ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ ЗА КОЕФІЦІЄНТОМ ВІДОБРАЖЕННЯ СВІТЛА

Мета роботи: Визначення якості обробки поверхні деталей за коефіцієнтом відображення світла.

11.1 Короткі теоретичні відомості

Якість поверхні деталі – це комплексний показник, який визначається геометрією поверхні, структурою та фізико-хімічними властивостями поверхні й приповерхніх шарів, а також залишковими напруженнями.

Якість поверхні деталей машин впливає на всі службові властивості машин: на опір втоми; на зносостійкість; на корозійну стійкість; на ерозійну стійкість і т.д. Якість поверхні не є постійним показником.

Деталі на кресленнях зображуються у вигляді елементів, обмежених поверхнями чітко визначеної геометричної форми. Розміри деталей, які визначають її форму – це номінальний профіль.

У процесі виготовлення одержують деталь, що відрізняється за формою та розмірами від номінальних. Ці відхилення форми і розмірів від ідеальних, заданих кресленням, називаються *технологічними*.

У процесі експлуатації розміри деталі починають відрізнятися і від номінальних форм і від технологічних відхилень. Ці відхилення називаються *експлуатаційними*.

Технологічні відхилення обробленої поверхні з погляду причин їх виникнення та методів виміральної техніки, застосованої для їхнього визначення, можна розділити на три категорії:

- макрогеометричні відхилення;
- мікроскопічні (хвилястість поверхні);
- субмікроскопічні (шорсткість поверхні).

Точне графічне зображення реального профілю одержують за допомогою приладу профілографа-профілометра. За допомогою цього приладу вимірюють клас шорсткості.

На практиці якісну оцінку підготовки поверхні після шліфування або полірування можна провести за допомогою визначення блиску поверхні.

Блиск може бути визначений декількома способами. Найпростіший спосіб визначення блиску є візуальне спостереження. Але воно дає лише якісне відображення та носить суб'єктивний характер.

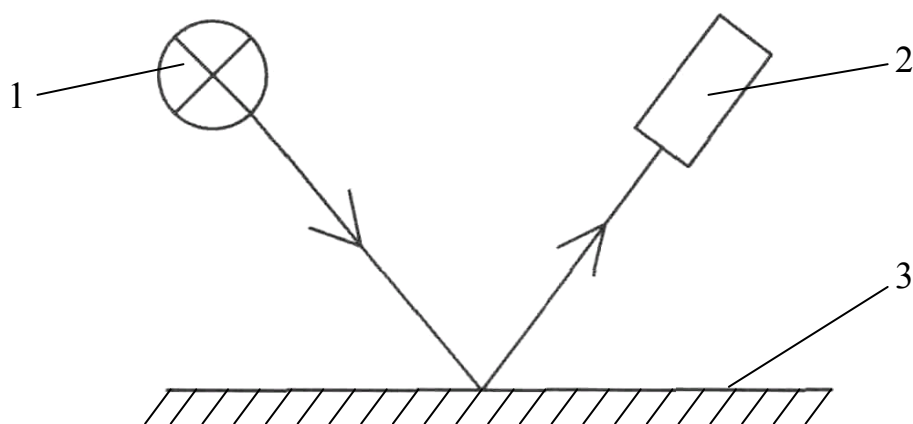
Блиск визначається співвідношенням між інтенсивністю дзеркально-відображеного і дифузійно-розсіяного світла. Тому блиск поверхні характеризується наступним рівнянням:

$$B = I_0 / (I_0 + I_p) = I_0 / I_c, \quad (11.1)$$

де I_0 – інтенсивність дзеркально- відображеного світла;
 I_p – інтенсивність дифузійно-розсіяного світла;
 B – блиск поверхні;
 $I_c = I_0 + I_p$ – сумарна інтенсивність світлового випромінювання.

У випадку ідеальної дзеркальної поверхні це співвідношення $I_0/I_c = 1$, так як $I_p = 0$. Чим більший блиск поверхні, тим ближче до одиниці співвідношення I_0/I_c .

Дзеркально-відображене світло вимірюється або оптичним приладом-фотометром, або приладом з фотоелементом. Схема вимірювання блиску поверхні за допомогою фотоелемента показана на рисунку 11.1.



1 – лампа накалювання; 2 – фотоелемент; 3 – поверхня деталі

Рисунок 11.1 – Схема вимірювання блиску поверхні за допомогою фотоелемента

Коефіцієнт відображення світла визначається наступним чином: вимірюється загальна інтенсивність відображеного і дифузійно-розсіяного світла від поверхні зразка і порівнюється з інтенсивністю такого ж світлового променя, відображеного від дзеркала (срібного або алюмінієвого), тобто:

$$K = I_1/I_2 * 100\%, \quad (11.2)$$

де K – коефіцієнт відображення світла;
 I_1 – величина фотоструму для дослідної поверхні;
 I_2 – величина фотоструму для дзеркальної поверхні.

Якісно блиск поверхні оцінюється наступним чином:

а) дзеркальний – чіткість відображення малюнка на покритті відповідає зображенню на дзеркалі;

- б) блискучий – чітке зображення малюнка на покритті, але верхній кінець зображення нечіткий;
- в) напівблискучий – зображення малюнка помітне, але нечітке;
- г) матовий – зображення малюнка дуже нечітке і помітне лише на найближчій до малюнку частині зразка;
- д) глибокоматовий – зображення предмету відсутнє.

11.2 Обладнання та матеріали

Лабораторна установка на базі полірувального станка, вимірювальний пристрій, набір наждачного паперу з різним розміром абразиву, дзеркало, зразки зі сталі.

11.3 Порядок виконання роботи

- 11.3.1 Підготувати зразки зі сталі з різною шорсткістю, поліруючи їх наждачним папером із різним розміром абразиву.
- 11.3.2 Визначити за допомогою вимірювального пристрою інтенсивність світлового променя, відображеного від дзеркала.
- 11.3.3 Визначити за допомогою вимірювального пристрою інтенсивність світлового променя, відображеного від поверхні зразків різної шорсткості.
- 11.3.4 За формулою 11.2 визначити коефіцієнт відображення світла для кожного зразку та порівняти їх.
- 11.3.5 Визначити ступінь блиску якісно для кожного зразка за вказаними критеріями.
- 11.3.6 Всі експериментальні та розрахункові дані занести до таблиці.
- 11.3.7 Побудувати графік залежності коефіцієнта відображення світла від шорсткості поверхні.

11.4 Зміст звіту

- 11.4.1 Назва роботи, мета та короткі теоретичні відомості.
- 11.4.2 Порядок виконання роботи.
- 11.4.3 Результати досліджень, аналіз отриманих даних, висновки по роботі.

11.5 Контрольні запитання

- 11.5.1 Характеристика якості поверхні деталей.
- 11.5.2 Види та категорії відхилень форми та розмірів деталей від ідеальних.
- 11.5.3 Способи визначення шорсткості поверхні.
- 11.5.4 Методика вимірювання коефіцієнту відображення світла.
- 11.5.5 Якісна оцінка блиску поверхні.

12 Лабораторна робота №12

ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ ТЕРТЯ

Мета роботи: Визначити сили тертя в залежності від навантаження

11.1 Короткі теоретичні відомості

Тертя спокою – тертя двох тіл при мікрозміщеннях, до переходу до відносного руху.

Тертя руху – тертя двох тіл, що перебувають у відносному русі.

Тертя ковзання – тертя руху двох твердих тіл, при якому швидкості тіл у місцях різні за величиною і напрямком, або лише за величиною, або за напрямком.

Тертя кочення – тертя руху двох твердих тіл, при якому їх швидкості в місцях торкання однакові за величиною і напрямком.

Сила тертя – сила опору при відносному переміщенні одного тіла на поверхні іншого під дією зовнішньої сили.

Найбільша сила тертя спокою – сила тертя спокою, будь-яке перевищення якої веде до виникнення руху.

Поверхня тертя – поверхня тіла, що приймає участь в терті.

Зовнішнє тертя поділяють на тертя ковзання та тертя кочення. При зовнішньому терті ковзання взаємодія твердих тіл обумовлена процесами, що відбуваються в тонких (до 10 мкм) поверхневих шарах цих тіл. Вона може відбуватись при відсутності змащувального матеріалу (сухе тертя) або при наявності його в зоні контакту в кількості, що виключає виникнення гідродинамічних ефектів (тертя при граничному змащенні).

При зовнішньому терті завжди відбувається деформування тонких поверхневих шарів тіл, що взаємодіють. Кількісною мірою зовнішнього тертя є сила зовнішнього тертя ($F_{\text{тр}}$). Дуже часто силу тертя порівнюють з зовнішньою силою, що прикладають до контактуючих твердих тіл, викликаючи їх ковзання. Ця сила дорівнює силі тертя, але має протилежний напрям.

Експериментально визначено, що при зсуві сила тертя зростає і при збільшенні зміщення одного твердого тіла відносно іншого до деякого значення залишається незмінною і незалежною від переміщення. Або вона зменшується до деякого значення, також незалежно від переміщення. Відносне мікрозміщення (δ) двох твердих тіл при терті виникає в межах переходу від стану спокою до відносного руху.

Сила тертя менша сили тертя спокою та залежить від зсуву, і називається неповною силою тертя спокою. Відношення сили тертя до нормальної сили відносно поверхні тертя зовнішньої сили (або нормальної складової цієї сили) називається коефіцієнтом тертя.

Ще наприкінці 15 століття Леонардо да Вінчі запропонував формулу:

$$F_{mp} = f \cdot N, \quad (12.1)$$

де F – сила тертя;
 N – сила реакції опори;
 f – коефіцієнт тертя ($f_{\text{сталь по сталі}} = 0,20$, $f_{\text{сталь по льоду}} = 0,015$).

Шарль Кулон у 18 столітті запропонував формулу:

$$F_{mp} = A + f \cdot N, \quad (12.2)$$

де A – сила схоплення або молекулярна складова.

Таким чином тертя – це процес, який має *молекулярно-механічну природу*.

Визначення сил та коефіцієнтів тертя має великий практичний та теоретичний інтерес. В процесі тертя відбувається перетворення роботи зовнішніх сил найбільшим чином в теплоту, а силові взаємодії викликають руйнацію поверхневих шарів деталей нерухомих з'єднань, тобто їх зношування. Велике значення сили тертя мають в забезпеченні роботи машин та безпеки руху. Використовуючи загальні положення теорії взаємодії твердих тіл при зовнішньому терті, можливо при мінімальних витратах отримувати суттєвий ефект.

Схема для визначення сили тертя представлена на рисунку 12.1.

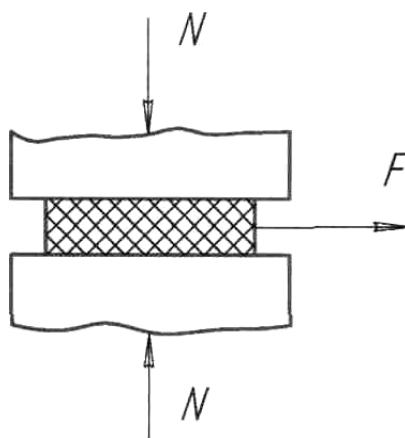


Рисунок 12.1 – Схема для визначення сили тертя

12.2 Обладнання та матеріали

Лабораторна установка, полімерний зразок, зразок з алюмінію, динамометрична скоба.

12.3 Порядок виконання роботи

12.3.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.

12.3.2 Закріпити полімерний зразок в тримачі.

- 12.3.3 Затиснути зразок і відмітити показник мікрометра.
- 12.3.4 За допомогою тарувального графіка визначити навантаження на зразок.
- 12.3.5 З малою швидкістю викручувати тримач з полімером, фіксуючи показання вимірювача деформацій до початку відносного руху.
- 12.3.6 За допомогою тарувального графіка визначити навантаження на зразок, що призвело до відносного руху.
- 12.3.7 Повторити пункти 12.3.2-12.3.6 для зразка з алюмінію.
- 12.3.8 Всі експериментальні та розрахункові дані занести до таблиці.
- 12.3.9 Побудувати графік залежності сили тертя спокою від навантаження.
- 12.3.10 Побудувати графік залежності коефіцієнта тертя від навантаження.

12.4 Зміст звіту

- 12.4.1 Назва роботи, мета та короткі теоретичні відомості.
- 12.4.2 Порядок виконання роботи.
- 12.4.3 Результати досліджень, аналіз отриманих даних, висновки по роботі.

12.5 Контрольні запитання

- 12.5.1 В чому різниця між тертям кочення та ковзання?
- 12.5.2 Характеристика зовнішнього тертя.
- 12.5.3 Молекулярно-механічна природа сили тертя.
- 12.5.4 Характеристика коефіцієнту тертя.
- 12.5.5 Способи зменшення коефіцієнту тертя.

13 Лабораторна робота №13

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТРИБОЕЛЕКТРИЧНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи: Визначити трибоелектричний потенціал різних матеріалів.

13.1 Короткі теоретичні відомості

Як відмічалось в лабораторній роботі №4, якщо контактуючі метали мають різну роботу виходу електронів, то відбувається перерозподіл електронів до рівноважного стану. При цьому один метал заряджається відносно іншого. Різниця потенціалів між ними називається контактною різницею потенціалів. Контактна різниця потенціалів лежить в основі електризації металів при їхньому взаємному зіткненні, взаємному ковзанні, ударі.

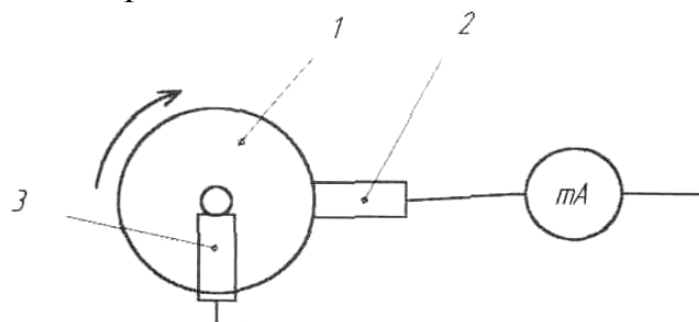
Таким чином, якщо два різнорідних матеріали (сталь з бронзою, сталь з алюмінієм та ін.) під навантаженням переміщувати один по одному, з'являється деяка напруга. Ця напруга змінюється від мілівольт до декількох вольт в залежності від хімічного складу металів.

Це явище відоме під назвою *трибоелектричного ефекту*. Такий ефект з'являється також при терті однорідних металів, один з яких є термообробленим. Якість обробки поверхонь зразків майже не впливає на трибоелектричний потенціал, але поверхні контактуючих металів повинні бути очищені від окалини та забруднювачів.

Випробування трибоелектричним методом дозволяють встановити вміст в вуглецевих сталях домішок (фосфору, сірки, кремнію). Цим методом визначають наявність міді в сплавах. Метод дозволяє відрізнити аустенітні корозійностійкі сталі від сталей інших марок, а також проводити сортування мідних сплавів в залежності від вмісту в них сурми.

13.2 Обладнання та матеріали

Лабораторна установка (рис. 13.1), розчин оцтової кислоти, алюмінієві та бронзові зразки, вольтметр.



1 – зразок №1; 2 – зразок №2; 3 – струмознімач

Рисунок 6.1 – Схема визначення трибоелектричного потенціалу

13.3 Порядок виконання роботи

- 13.3.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.
- 13.3.2 Закріпити зразок на валу двигуна;
- 13.3.3 Підключити вольтметр;
- 13.3.4 Фіксувати початкові та кінцеві показники вольтметра;
- 13.3.5 Виконати пункт 13.3.3 при наявності сухого тертя (повітря), а потім при наявності кислого середовища (розчин оцтової кислоти);
- 13.3.6 Виконати пункти 13.3.2-13.3.5 з алюмінієвим та бронзовим зразками;
- 13.3.7 Всі експериментальні дані занести до таблиці.
- 13.3.8 Побудувати графічну залежність трибоелектричного потенціалу від швидкості.

13.4 Зміст звіту

- 13.4.1 Назва роботи, мета та короткі теоретичні відомості.
- 13.4.2 Порядок виконання роботи.
- 13.4.3 Результати досліджень, аналіз отриманих даних, висновки по роботі.

13.5 Контрольні запитання

- 13.5.1 Природа виникнення контактної різниці потенціалів.
- 13.5.2 Характеристика трибоелектричного ефекту.
- 13.5.3 Методика визначення трибоелектричного потенціалу.
- 13.5.4 Залежність трибоелектричного потенціалу від стану поверхні.
- 13.5.5 Практичне застосування трибоелектричного ефекту.

14 Лабораторна робота №14

ВИВЧЕННЯ БУДОВИ І РОБОТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГАЗОТЕРМІЧНОГО РОЗПИЛЕННЯ ПОРОШКІВ УПТР-87

Мета роботи: Набути практичні навички роботи на установці для газополум'яного напилення і вивчити її будову.

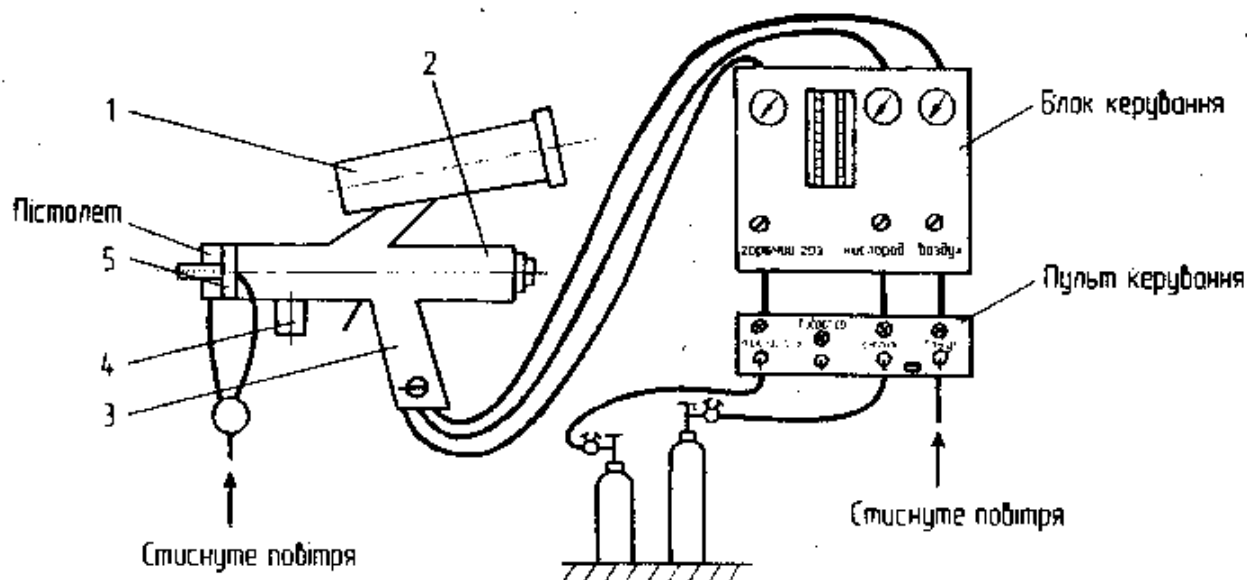
14.1 Короткі теоретичні відомості

Обладнання для газополум'яного напилення знайшло широке застосування для нанесення покриття із самофлюсуючих сплавів на основі нікелю та кобальту, а також для напилення керамічних та інших тугоплавких матеріалів.

Технологія газополум'яного напилення проста, вартість обладнання й затрати на експлуатацію низькі, тому цей спосіб є дуже розповсюдженим.

Широко використовується газополум'яне напилення для отримання антикорозійних, зносостійких, теплоізоляційних та інших покриттів, для відновлення деталей машин.

В залежності від стану матеріалу, що наноситься, газополум'яне напилення може бути: дротяне, пруткове та порошкове. Загальний вигляд установки для порошкового термічного розпилення УПТР-87 показаний на рисунку 14.1.



1 – порошковий живильник; 2 – корпус; 3 – рукоятка;
4 – вібратор; 5 – пристрій для динамічної активації

Рисунок 1.1 – Загальний вигляд установки УПТР-87

В основі роботи установки лежить принцип газотермічного напилення, при якому порошок подається транспортуючим газом у полум'я, яке утворюється

при згоранні суміші горючого газу з киснем, де він нагрівається до рідкого або пластичного стану і наноситься на попередньо підготовлену поверхню з високою швидкістю, утворюючи шар напиленого покриття. Товщину шару регулюють з'єднувальними вставками, числом проходів та швидкістю переміщення терморозпилювального пістолета відносно поверхні, що напилюється.

Установка складається з пістолета, пульта управління, блока управління та розташованих на пістолеті вібратора (4) і пристрою для динамічної активації (5). Пістолет складається із корпусу (2), на якому змонтовані порошковий живильник (1), змішувач газів та рукоятка (3), в нижній частині якої вмонтовано пристрій управління подачі газів. В отворах рукоятки розміщені плунжери, що регулюють подачу кисню та горючого газу.

Порошковий живильник складається з бункера, закріпленого на кронштейні, в якому вмонтована з'єднувальна вставка для управління подачею порошку.

Корпус включає в себе механізм подачі порошку та голчатий кран. Курок механізму подачі порошку з'єднаний з поршнем, який, взаємодіючи з клапаном порошкового живильника, вмикає або вимикає подачу порошку.

Пістолет укомплектований сопловими наконечниками, що призначаються для різних матеріалів порошку та його фракцій.

Пульт управління складається з каркасу, на якому змонтовані крани управління киснем, стиснутим повітрям і ацетиленом; манометри для контролю тиску у магістралях; блок ротаметрів для контролю за витратою горючого газу та кисню; захисні клапани, що призначені для вогнезахисту пульта управління та джерела газів від зворотних ударів.

На передній панелі блоку управління встановлені органи управління та вихідний роз'єм для підключення одного із зовнішніх пристроїв: пістолета порошкового або газополум'яного пальника.

На задній панелі встановлені електромагнітні пневмоклапани для подачі робочих газів та стиснутого повітря.

14.2 Обладнання та матеріали

Установка порошкова терморозпилювальна УПТР-87; деталь, що захищається; порошок для напилення.

14.3 Порядок виконання роботи

14.3.1 Ознайомитися з питаннями техніки безпеки.

14.3.2 Вивчити будову пістолету.

14.3.3 Підготувати установку до роботи.

14.3.3.1 Встановити редукторами, що знаходяться на джерелах робочих газів, наступні тиски: кисню 0.4-0.5 МПа, горючого газу 0.15 МПа, стиснутого газу 0.4-0.5 МПа.

- 14.3.3.2 Встановити тумблер "Сеть" блоку управління у верхнє положення, при цьому загоряється індикаторний світлодіод.
- 14.3.3.3 Встановити тумблери "Ацетилен", "Кислород" та "Воздух" на блоці управління у верхнє положення, при цьому загоряються індикаторні світлодіоди.
- 14.3.3.4 Повернути рукоятку управління пістолетом вниз до фіксації у крайньому положенні.
- 14.3.3.5 Продути газові магістралі, встановивши кранами на пульті управління наступні тиски газів по показанням манометрів:
- | | |
|-----------------|----------------|
| кисню | 0,15-0,18 МПа; |
| ацетилену | 0,09-0,12 МПа; |
| пропан-бутану | 0,09-0,15 МПа; |
| стиснутого газу | 0,05 МПа. |
- 14.3.3.6 Ротаметри повинні показувати наступні витрати газів:
- | | |
|-----------------|------------------------------|
| кисню | 1,5-2,0 м ³ /год; |
| ацетилену | 0,9-1,7 м ³ /год; |
| пропан-бутану | 0,6-1,0 м ³ /год; |
| стиснутого газу | 1,0 м ³ /год. |
- 14.3.3.7 Після продувки тумблери "Ацетилен", "Кислород", "Воздух" встановити в нижнє положення.
- 14.3.3.8 Зняти кришку з бункера й засипати в нього порошок (3/4 об'єму). Закрити кришку.
- 14.3.3.9 Встановити тумблер "Воздух" у верхнє положення.
- 14.3.3.10 Відкрити подачу порошку натисненням курку пістолета до упора і відрегулювати необхідну витрату порошку краном, що розташований в задній частині корпусу пістолета.
- 14.3.3.11 Закрити подачу порошку натисненням курку пістолета до упора.
- 14.3.3.12 Встановити тумблер "Воздух" в нижнє положення.
- 14.3.3.13 Встановити тумблер "Сеть" в нижнє положення. Установка готова до роботи.
- 14.3.4 Провести напилення.
- 14.3.4.1 Підготувати деталь для напилення. Механічно (наждачним папером) очистити поверхню від бруду, іржі та створити шорсткість поверхні.
- 14.3.4.2 Встановити тумблер "Сеть" та "Кислород" у верхнє положення.
- 14.3.4.3 Перевести рукоятку управління пістолетом у проміжний стан.
- 14.3.4.4 Встановити тумблер "Ацетилен" у верхнє положення. Запалити горючу суміш.
- 14.3.4.5 Перевести рукоятки управління пістолетом вниз до фіксації у крайнє положення. При необхідності відрегулювати полум'я пістолета кранами на пульті управління.
- 14.3.4.6 Встановити тумблер "Воздух" у верхнє положення.
- 14.3.4.7 Відкрити подачу порошку натисненням курка пістолета до упора.
- 14.3.4.8 Направити потік на поверхню, що обробляється. Дистанція напилення повинна складати 150-250 мм, що залежить від

хімічного складу порошку та розмірів деталі. Швидкість переміщення пістолета відносно деталі повинна бути 15-60 м/хв.

14.3.4.9 Після закінчення напилення вимкнути установку у зворотній послідовності.

14.3.5 Оцінити якість нанесеного покриття.

14.4 Зміст звіту

14.4.1 Назва роботи, мета і короткі теоретичні відомості.

14.4.2 Підготовка установки до роботи.

14.4.3 Висновки по роботі.

14.5 Контрольні запитання

14.5.1 Характерні особливості установки для газополум'яного напилення.

14.5.2 Склад установки УПТР-87.

14.5.3 Порядок підготовки установки до роботи.

14.5.4 Матеріали, що використовуються для створення покриттів при газополум'яному напиленні.

14.5.5 Горючі гази, що використовуються для газополум'яного напилення.

15 Лабораторна робота №15

БУДОВА УСТАНОВКИ ДЛЯ ДЕТОНАЦІЙНОГО НАПИЛЮВАННЯ “ДНЕПР – 3”

Мета роботи: Вивчити будову установки для детонаційного напилювання “ДНЕПР – 3”.

15.1 Короткі теоретичні відомості

Детонаційно–газова установка “ДНЕПР – 3” призначена для нанесення зносостійких, корозійностійких, електроізоляційних, фрикційних, антифрикційних, жаростійких, електропровідних покриттів із порошків, карбідів, металів, твердих сплавів і композиційних матеріалів на поверхню деталей машин, приборів, апаратів та інструментів при їх виготовленні та при відновлювальному ремонті.

Технічні дані і характеристики:

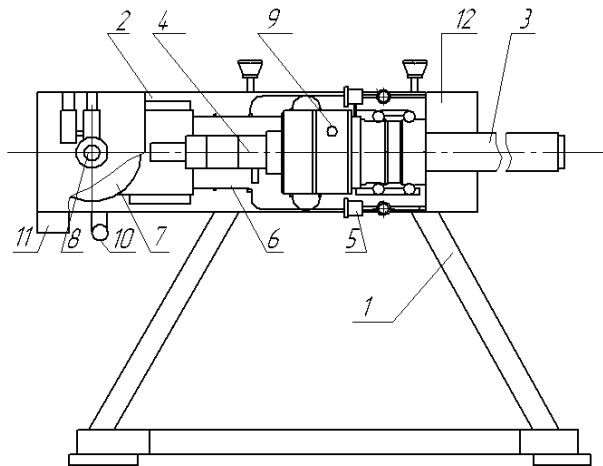
витрата порошку за вибухом, m^3	$1,5 \cdot 10^{-8}$;
витрата води, m^3/c	$1 \cdot 10^{-4}$;
частота пострілу, $Гц$	$1 \div 10$;
діаметр розгінної частини ствола, m	0,022;
товщина покриття за постріл, $мкм$	$5 \div 20$;
продуктивність при товщині покриття 15 $мкм$, $m^2/год$	$0,8 \div 3,5$;
потужність, $Вт$	200;
рівень звукового тиску, $дБ$	150.

Пушка детонаційно–газова призначена для перетворення реакції окислення газоподібного палива в теплову і кінетичну енергію продуктів детонації, що використовується для нагріву і розгону порошку, введеного в ствол, з метою одержання покриття.

Пушка (рис.15.1) має в своєму складі: станину 1; корпус 2; ствол 3; розпилювач порошку 4; полум’ягасники 5; фазовий газорозподілювач 6; привід 7; переривач струму – газу 8; свічка запалювання 9; котушка запалювання 10; пускач магнітний 11; ресивер 12.

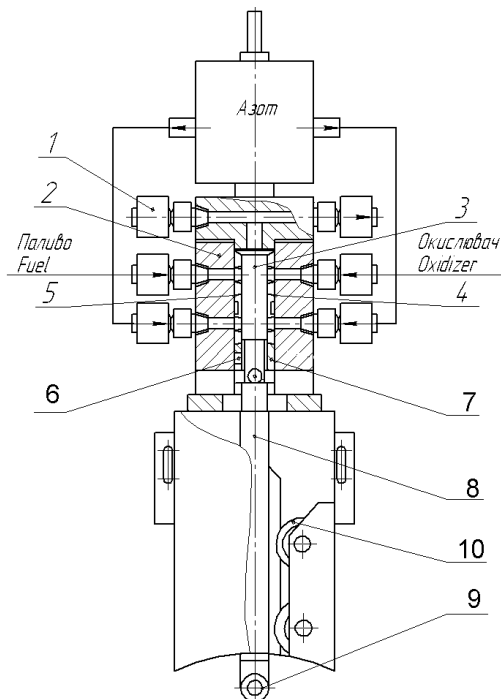
Фазовий газорозподілювач (рис. 15.2) призначений для подачі робочих газів у ствол відповідно до циклограми і має: вхідні і вихідні штуцери 1, циліндр 2, що має радіальні і повздовжні канали, поршень 3, розпірні кільця 4, газопровідні кільця 5, ущільнюючі кільця 6, регулювальні гайки 7, штовхач 8, ролик штовхача 9, направляючі роликів 10.

Принцип роботи фазового газорозподілювача полягає в послідовному відкритті і закритті газопровідних каналів при здійсненні поршнем 3 зворотно-поступальних рухів щодо циліндра 2. Закон руху поршня визначається профілем кулачка, встановленого на приводі 7 (рис. 15.1), виконаним відповідно до фаз робочого циклу: 1 – продувка інертним газом після вибуху; 2 – заповнення буферів газами; 3 – подача порошку; 4 – вибух.



- 1 – станина; 2 – корпус; 3 – ствол; 4 – розпилювач порошку;
 5 – полум'ягасники; 6 – фазовий газорозподільвач; 7 – привід;
 8 – переривач струму – газу; 9 – свічка запалювання; 10 – котушка
 запалювання; 11 – пускач магнітний; 12 – ресивер

Рисунок 15.1 – Гармата детонаційна газова «Днепр-3»



- 1 – штуцера; 2 – циліндр; 3 – поршень; 4 – розпірні кільця;
 5 – газопровідні кільця; 6 – ущільнюючі кільця; 7 – регулювальні гайки;
 8 – штовхач; 9 – ролик штовхача; 10 – направляючі роликів

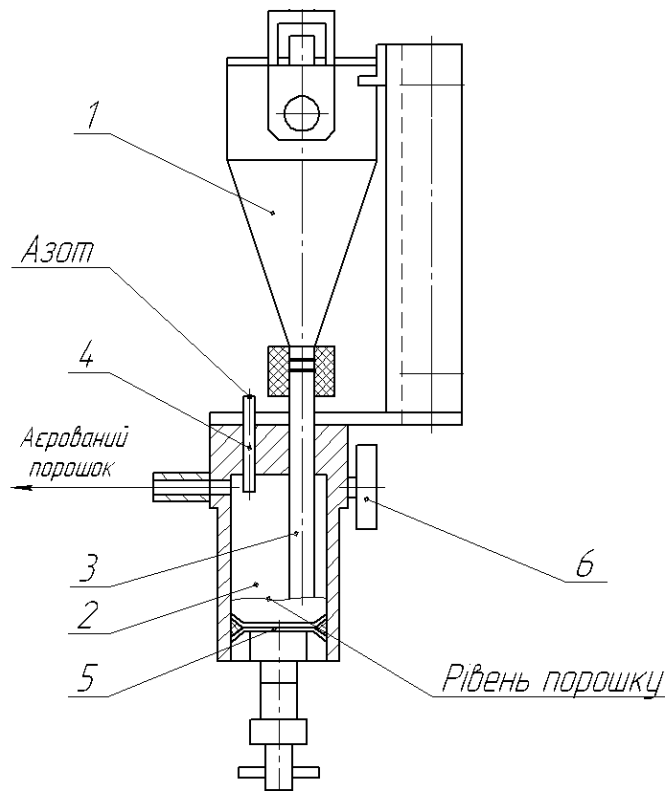
Рисунок 15.2 – Фазовий газорозподільвач

Ствол призначений для здійснення чотирьохфазного робочого циклу, а також нагріву і розгону напилюваного порошку і містить: буфер, сопло, що

складаються з вибухової камери і розгінної ділянки, кожух водяного охолодження, розпилувач порошку.

Переривник струму-газу призначений для розмикання первинного ланцюга запалення для перетворення безперервного потоку транспортуючого газу в пульсуючий, необхідний для роботи живильника в імпульсному режимі, і містить: корпус, кришку, диск, переривник, імпульсний клапан, зворотний клапан.

Порошковий живильник (рис. 15.3) призначений для подачі дози порошку в розгінну ділянку ствола гармати і має: завантажувальний бункер 1, розпилювальний бункер 2, трубку рівня 3, розпилувач 4, рухоме днище 5, вібратор 6.



1 – завантажувальний бункер; 2 – розпилювальний бункера;
3 – трубку рівня; 4 – розпилувач; 5 – рухоме днище; 6 – вібратор.

Рисунок 15.3 – Порошковий живильник

Електрична схема установки забезпечує: подачу і регулювання напруги на електродвигун постійного струму, подачу напруги на електроклапани, встановлені на гарматі і газовому пульті, подачу напруги на контакти манометра, електроконтакту, встановленого на газовому пульті, подачу напруги на свічку запалювання.

Керування роботою установки здійснюється з пульта управління. На панель управління виведені рукоятки перемикачів “Мережа”, “Мотор”, рукоятка потенціометра “Частота” і рукоятки тумблерів “Продувка”, “Окислювач”, “Паливо”, “Порошок”. За допомогою перемикачів “Мережа” і

“Мотор”, вмикають пульт управління і запускають електродвигун, що через кулачок приводить у рух поршень фазового газорозподільника.

При вмиканні тумблера “Продувка” відкривається електромагнітний клапан на пульті газів і азот газів канали циліндра.

При вмиканні тумблерів “Окислювач” і “Паливо” відкриваються встановлені електромагнітні клапани, і горючі гази і кисень поступають в газові канали циліндра.

15.2 Обладнання та матеріали

Установка для детонаційного наплення “ДНЕПР-3”.

15.3 Хід виконання роботи

15.3.1 Ознайомитись з питаннями техніки безпеки.

15.3.2 Ознайомитись з будовою установки “ДНЕПР-3”.

15.3.3 Ознайомитись з принципом роботи установки “ДНЕПР-3”.

15.4 Зміст звіту

15.4.1 Назва роботи, мета і короткі теоретичні відомості

15.4.2 Висновки по роботі.

15.5 Контрольні запитання

15.5.1 Основні елементи установки для детонаційного наплення.

15.5.2 Гази, що використовуються при детонаційному напленні.

15.5.3 Принцип роботи фазового газорозподільника.

15.5.4 Принцип роботи порошкового живильника.

15.5.5 Основні параметри режиму детонаційного наплення.

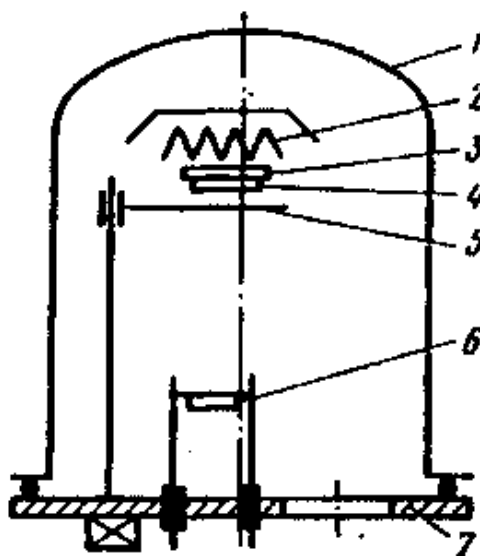
16 Лабораторна робота №16

ТЕХНОЛОГІЯ ТЕРМІЧНОГО ВАКУУМНОГО НАПИЛЕННЯ

Мета роботи: Вивчити техніку і технологію вакуумного нанесення металевих плівок на поверхні деталей.

16.1 Короткі теоретичні відомості

Технологія термічного вакуумного напилення відрізняється від інших способів вакуумного осадження плівок високою продуктивністю процесу та відносно простим обладнанням для напилення. Особливістю методу термічного вакуумного напилення є те, що утворювані плівки мають товщину до декількох мікрметрів. Схема процесу розпилення показана на рисунку 16.1.



1 – ковпак; 2 – нагрівальні підкладки; 3 – тримач; 4 – підложка (деталь);
5 – захисний екран; 6 – випалювач; 7 – опорна плита

Рисунок 16.1 – Схема процесу термічного розпилення

Термічне напилювання ґрунтоване на властивості молекул металів і деяких інших неорганічних матеріалів в умовах високого вакууму переміщуватися прямолінійно променеподібно та осідати на холодні поверхні, поставлені на шляху їх руху, завдяки відсутності взаємних зіткнень і тертя. Створення у камері тиску $10^{-4} - 10^{-5}$ мм. рт. ст. пояснюється тим, що такий тиск забезпечує необхідну довжину вільного пробігу, яку атоми металу, що випаровується, повинні пройти до конденсації на оброблюваному виробі, не зіштовхуючись з атомами та молекулами залишкового газу камери. Наприклад, якщо тиск у камері 10^{-2} мм. рт. ст., то середня довжина вільного пробігу молекули рівна 0,45 мм, а при 10^{-4} мм. рт. ст. – 450 мм. Відстань між підкладкою та випарником повинна бути менше довжини вільного пробігу. Тільки атоми, які

зберегли вихідну енергію (не зіштовхуючись), будуть володіти необхідною адгезією з основою.

Напилення будь-якої плівки пов'язане з трьома основними процесами: випаровування металу з поверхні випарника; перенесення частинок пару від джерела до деталі; конденсація частинок пару на поверхні деталі. Випаровування проводиться шляхом нагрівання матеріалу у вакуумі. При цьому кінетична енергія молекул і атомів в поверхневому шарі збільшується, вони відриваються від поверхні і поширюються у вільному просторі. З підвищенням температури і зі збільшенням енергії молекул зростає кількість частинок, здатних відриватись від поверхні матеріалу, який випаровується. При нагріванні матеріалу він спочатку плавиться, а потім утворюється пар. Але це характерно не для всіх матеріалів. Деякі метали (Mg, Cd, Cr, Zn) при нагріванні переходять в пар без розплавлення. Такий процес називають *сублімацією* твердого металу. Температура, при якій пружність пару даного металу досягає 1,33 Па, називають температурою випаровування цього металу.

При випаровуванні металів розрізняють три режими витікання парів:

1. Молекулярний (режим Кнудсена) – при тиску залишкових газів і парів нижче 10^{-6} мм.рт.ст. або при $P \cdot L < 5 \cdot 10^{-3}$, де P – тиск, мм рт.ст., L – розмір посудини, см.
2. Перехідний ($P = 10^{-6} \dots 1$ мм рт. ст.).
3. В'язкістий ($P = 1 \dots 760$ мм рт. ст., $P \cdot L > 0,5$).

Швидкість випаровування визначається кількістю металу, який випарувався з одиниці площі за одиницю часу ($\text{г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$). Швидкість випаровування при молекулярному режимі обчислюють по рівнянню Ленгмюра:

$$V_{\text{исп}} = \alpha \cdot P_{\text{Me}} \cdot 5,833 \cdot \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (16.1)$$

де P_{Me} – тиск пари при певній температурі (T , К), мм рт. ст.;

T – температура випаровування металу, який випаровується, К.

M – молекулярна маса, г/моль;

α – коефіцієнт Ленгмюра (акомодації), що залежить від умов відводу пари. При віднесенні пари газової або повної конденсації пари $\alpha = 1$.

Необхідно зазначити, що рівняння Ленгмюра при $\alpha = 1$ дає максимальну швидкість випару речовини.

При перехідному режимі, коли тиск залишкових газів ($P_{\text{ост}}$) у системі нижче рівноважної пружності пари (P_{Me}) і загальний тиск у системі від 10^{-6} до 1 мм.рт.ст., при $\alpha = 1$ швидкість випару можна оцінити по формулі:

$$V_{\text{исп}} \approx (P_{\text{Me}} - P_{\text{ост}}) \cdot 5,833 \cdot \sqrt{\frac{M}{T}}, \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}). \quad (16.2)$$

Після випаровування має місце конденсація пару на поверхні деталі, і метал з газоподібної фази переходить у тверду. При конденсації на деталі утворюється плівка металу. Конденсація залежить від температури деталі, щільності атомного пучка металу, який випаровується, стану поверхні деталі та наявності залишкових газів. Молекули залишкового газу реагують з металом, окислюючи його. Тонкий окисний шар на границі плівка-поверхня деталі впливає на адгезію плівки, тому плівки, які окислюються краще (хром, залізо, титан) мають кращу адгезію, ніж плівки, котрі погано піддаються окисленню (золото, срібло, нікель, тощо).

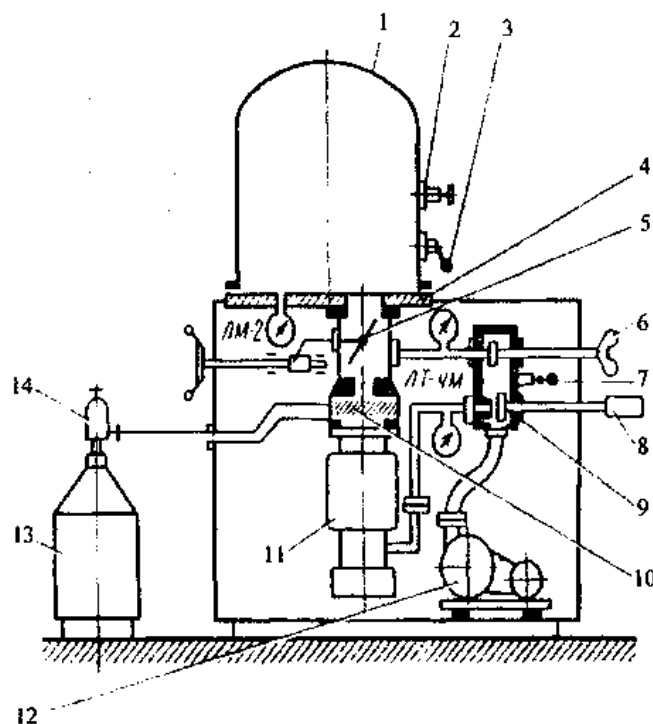
16.2 Обладнання та матеріали

Установка вакуумного термічного розпилення типу УРМ; зразки деталей; випарники; метали, які будуть випаровуватись; пінцет; секундомір; аналітичні ваги.

16.3 Порядок виконання роботи

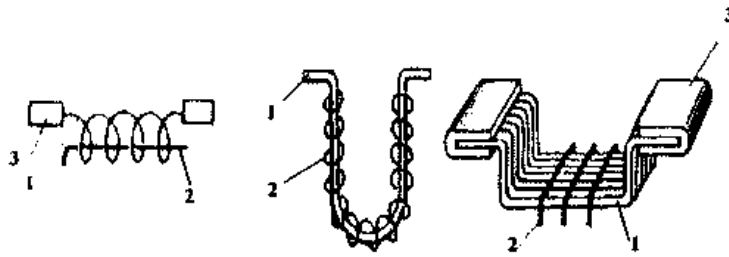
16.3.1 Ознайомитись з інструкцією по техніці безпеки.

16.3.2 Ознайомитись зі схемою вакуумної системи установки УРМ (рисунок 16.2), з конструкцією дротяних випарників (рисунок 16.3).



- 1 – ковпак; 2, 3 – натікачі; 4 – стіл; 5 – затвор; 6, 8 – клапани; 7 – вентиль;
 9 – корпус клапанів; 10 – азотний уловлювач; 11 – дифузійний насос;
 12 – механічний насос; 13 – посуд з азотом, 14 – вентиль.

Рисунок 16.2 – Схема вакуумної системи установки типу УРМ



1 – дріт випарника; 2 – навіска металу, який випаровується;
3 – мідні струмопровідні шини.

Рисунок 16.3 — Конструкції дротяних випарників

16.3.3 Провести зважування деталі до напилення.

16.3.4 Провести напилення на поверхню деталі. Перед початком роботи потрібно перевірити правильність вихідного положення всіх рукояток і перемикачів установки, відсутність зовнішніх пошкоджень. Включити електроживлення і водопостачання установки холодною водою, проконтролювати при цьому тиск води по манометру. Увімкнувши механічний насос, відкривши клапан 8 (рисунок 16.2), увімкнути термопарний вакуумметр і відкачати паромасляним насосом до тиску $1,33 \text{ Па}$. Увімкнути електронагрівач паромасляного насосу і прогріти його протягом 10 хвилин. Натікачем 3 напустити повітря під ковпак. З допомогою гідроприводу підняти ковпак. Встановити чисті випарники на струмопідводи. Опустити ковпак. Закрити клапан 8, відкрити клапан 6 і, відкачавши робочу камеру до тиску $1,33 \text{ Па}$, перемкнути клапан в попереднє положення. Відкрити затвор, увімкнувши іонізаційний вакуумметр на прогрів, і через 10 хвилин перемкнути на вимірювання вакууму, попередньо відкалібрувавши його. При вакуумі в робочій камері не більше $6,65 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ подати холодну воду на ковпак і провести відпал випарника, для чого плавно збільшувати прохідний струм через випарник, довівши його до величини на 20-30 А більшої ніж потрібно для технологічної операції; при цьому постійно слідкувати за вакуумом в робочій камері, не допускаючи його падіння нижче, ніж $11,97 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$. Витримати випарник в цьому режимі, поки вакуум не підвищиться до $6,65 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$, після цього увімкнути струм, який проходить через випарник. Закрити затвор, відключити іонізаційний вакуумметр. Відкрити вентиль натікача, запустивши повітря в робочу камеру. Підняти ковпак, загрузити у випарник навіски алюмінію, закріпити чисту підкладку в підложкотримачі і встановити на робочу позицію над випарником. Опустити ковпак і відкачати робочу камеру, виконуючи вже описані вище переходи, до тиску не вище $2,66 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$. Відкачування робочої камери паромасляним насосом і вимірювання тиску в ній проводити протягом всього процесу осадження плівки і до охолодження підкладки. Включити нагрівач підложки і довести температуру до $110-120 \text{ }^\circ\text{C}$. Подати струм на випарник і, плавно збільшуючи, довести його до величини, при якій

відбувається відпал випарника. Після розплавлення навіски почекати ще 10 с до зникнення білого нальоту з поверхні алюмінію, потім знизити струм на 20-30 А. Вимкнути підігрів підкладки і струм через випарник. Закрити затвор, увімкнути іонізаційний вакуумметр. Вентилем-натікачем напустити повітря в робочу камеру. Підняти ковпак, зняти охолоджену підложку з напиленим покриттям і оцінити якість нанесеного шару.

Увага! *Інколи в виробничих умовах виникає необхідність аварійного відключення установки. У випадку відключення електроенергії потрібно перекрити канали, які ведуть до механічного насосу і напустити в нього повітря, потім закрити затвор і виключити електромагнітні пускачі електроживлення установки.*

При відключенні холодної води в першу чергу необхідно відключити нагрівач паромасляного насосу, а потім діяти так, як при загальному відключенні установки, але обов'язково проконтролювати перед відключенням механічного насосу достатню ступінь охолодження паромасляника.

При аварійному прориві атмосфери під ковпак під час відкачки робочої камери паромасляним насосом необхідно перш за все закрити високовакуумний затвор, а потім діяти як і в попередньому випадку.

16.3.5 Зважити деталь після напилення.

16.3.6 Розрахувати товщину напиленого шару та швидкість випаровування.

16.3.7 Порівняти значення отриманої швидкості з теоретичною (формула 16.1).

16.4 Зміст звіту

16.4.1 Назва роботи, мета і короткі теоретичні відомості.

16.4.2 Порядок виконання роботи.

16.4.3 Результати дослідів.

16.4.4 Аналіз отриманих результатів, висновки.

16.5 Контрольні запитання

16.5.1 Характеристика вакуумно-термічного напилення.

16.5.2 Компоненти вакуумної системи.

16.5.3 Конструкції випарників.

16.5.4 Умови, при яких можливе напилення металу.

16.5.5 Принцип роботи установки для вакуумного напилення.

17 Лабораторна робота №17

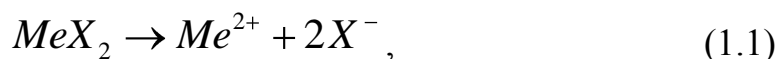
ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

Мета роботи: Вивчити техніку і технологією електрохімічного методу нанесення плівок.

16.1 Короткі теоретичні відомості

Гальванічний спосіб осадження металів відкритий у 1838 році у Петербурзі академіком Б.С. Якобі. У водний розчин солі металу поміщають металічну пластину та виріб, на який наноситься покриття. До пластини і виробу підводять постійний струм. При цьому пластина стає анодом, а виріб – катодом (рисунок 17.1). Електрохімічне осадження металів засновано на електрохімічних законах перетворення речовин на границі поділу провідників першого і другого роду.

Суть електролізу. В водних розчинах молекули солей, кислот і лугів дисоціюють (розпадаються) на електрично-зарядженні частинки – іони. Наприклад, в розчині електроліту при дисоціації утворюються іони:



де X^{-} – сульфат, нітрат та інші іони.

Це перша стадія електрохімічного осадження металів.

Друга – під впливом електричного струму відбувається перенос іонів з об'єму електроліту до електродів.

Третя – відбувається два види перетворень. В результаті на аноді звільняються електрони, а на катоді електрони приєднуються.

Четверта – дифузія адсорбованих атомів по поверхні електроду до місця росту плівки та втілення в кристалічну ґратку.

Осадження металів на катоді чи розчинення їх на аноді відбувається у відповідності до закону Фарадея: *кількість речовини, яка виділилася на катоді чи розчинилася на аноді, прямо пропорційна кількості електрики, що пройшла через розчин:*

$$m = \frac{I \cdot \tau \cdot A}{26,8 \cdot Z}, \quad (1.2)$$

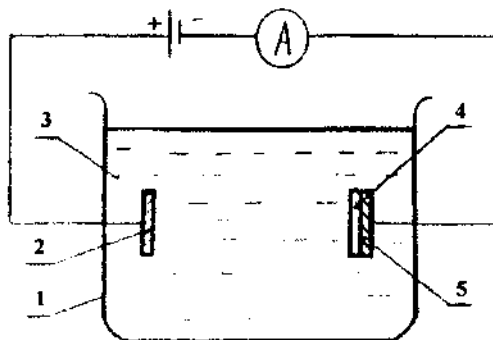
де A – атомна маса металу (г/моль);

Z – валентність;

τ – час (год.);

I – сила струму (А).

На катоді, як правило, крім металу, виділяється також і водень. Внаслідок цього практично виділена кількість металу завжди менша, ніж розрахована теоретично.



1 – ванна; 2 – анод; 3 – електроліт; 4 – осадувана плівка; 5 – катод

Рисунок 4.1 – Конструктивна схема електролітичної ванни

За допомогою електрохімічного осадження можна наносити цинк, нікель, олово, мідь, хром та інші метали для отримання декоративних, зносостійких, корозійностійких покриттів, для відновлення деталей машин. Наприклад, мідь використовується для створення декоративних покриттів, струмопровідних шарів, для створення мідної фольги, а також для створення проміжного м'якого прошарку на поверхнях деталей, що зварюються, дифузійним зварюванням у вакуумі.

Електроліти, які використовують для осаджування міді, можна розділити на два основні класи: кислі і комплексні, в яких мідь знаходиться у вигляді негативних або позитивних заряджених комплексних іонів. В кислих електролітах неможливо осаджувати мідь на метали більш електронегативні, чим мідь. Склад сірчанокислого електроліту наведено в таблиці 17.1.

Таблиця 17.1 – Склад сірчанокислого електроліту та інші показники для міднення

Мідь сірчанокисла (мідний купорос)	200-250 г/л
Кислота сірчана	50-70 г/л
Температура	15-25 °С
Густина струму	0,1-0,3 А/мм ²
Швидкість осадження	0,2-0,6 мкм/хв

Хром застосовують для декоративного покриття, підвищення твердості і жаростійкості поверхні металу, а також для утворення поверхонь, які добре відбивають світло. Хромові покриття пористі, тому під ними на чорних металах згодом виникає корозія. Для підвищення антикорозійної стійкості застосовують багат шарове покриття: мідь-нікель-хром або нікель-мідь-нікель-хром.

Якість хромового покриття залежить також від температури електроліту. Наприклад, якщо ванна працює при температурі 30-55 °С, то поверхня стає блискучою. При температурі нижче 30 °С покриття набуває матового відтінку, а вище 55-80 °С – молочного. У хромових ваннах анодами служить свинець або сплав свинцю (93%) і сурми (7%). Склад електроліту залежить від властивостей плівки хрому, яку треба одержати (табл. 17.2).

Таблиця 17.2 – Електроліти для хромування

Вид або колір покриття	Компоненти, масові частини на 100 масових частин води					
	Хромовий ангідрид	Сірчана кислота	Оцтова кислота	Оцтово-кислий кальцій	Температура електроліту, °С	Густина струму, А/дм ²
Декоративне	350	3,5	-	-	35-40	10-15
Тверде	150	1,5	-	-	50-55	45-100
Чорне	250	-	6,25	8	25-30	100

17.2 Обладнання та матеріали

Лабораторна установка для осаджування металу; пінцет; секундомір; металічні зразки (деталі).

17.3 Порядок виконання роботи

17.3.1 Ознайомитись з інструкцією по техніці безпеки.

17.3.2 Ознайомитись з роботою установки (рисунок 17.2).

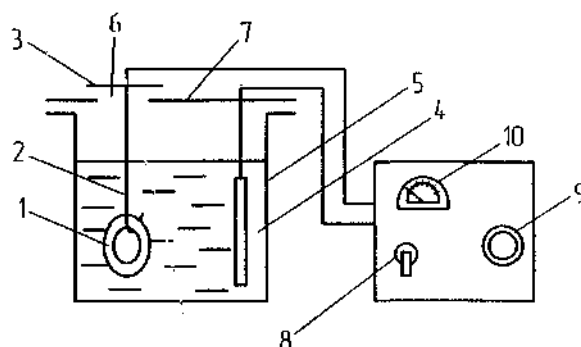


Рисунок 17.2 – Установка для електрохімічного нанесення покриттів

17.3.3 Провести осаджування міді на деталі.

17.3.3.1 Деталь перед мідненням очистити в ацетоні.

17.3.3.2 Закріпити деталь 1 в тримачі 2 кришки 3, занурити деталь 1 в електроліт 4 ванни 5 через вікно 6 кришки 7.

17.3.3.3 Включити джерело живлення переводом тумблера 8 в положення "Вкл". Використовуючи ручку 9 ЛАТРА, по вольтметру 10 виставити напругу 6-12 В. Тривалість процесу

визначити експериментально.

17.3.3.4 По закінченні процесу відключити джерело постійного струму, вийняти деталь, промити під краном, просушити.

17.3.4 Провести осаджування хрому на деталі.

17.3.5 Провести візуальний контроль поверхні деталі.

17.3.6 Порівняти дані, отримані при розрахунку маси теоретичним та практичним шляхами.

17.4 Зміст звіту

17.4.1 Назва роботи, її мета і короткі теоретичні відомості.

17.4.2 Порядок виконання роботи.

17.4.3 Результати дослідів, аналіз отриманих даних, висновки.

17.5 Контрольні запитання

17.5.1 Суть електролізу.

17.5.2 Обладнання для електролітичного нанесення покриттів.

17.5.3 Склад електроліту.

17.5.4 Вибір анодних пластин.

17.5.5 Підготовка поверхні.

18 Лабораторна робота №18

ТЕХНОЛОГІЯ ТЕРМІЧНОГО ОКСИДУВАННЯ

Мета роботи: Ознайомитись з технологією термічного оксидування сталей.

18.1 Короткі теоретичні відомості

Оксидування – створення оксидної плівки на поверхні виробів в результаті окислювально-відновлюваної реакції. Оксидування переважно використовують для отримання захисних та декоративних покриттів, а також для формування діелектричних шарів. Розрізняють термічні, хімічні, електрохімічні та плазмові методи оксидування. До оксидних покриттів, отриманих різними методами, відносяться: вороніння сталі, анодування алюмінію, оксидування міді, срібла, цинку, магнію та ін.

Термічне оксидування – це формування шару оксиду на підложці шляхом витримки зразка в окислювальному середовищі (O_2 або водяний пар) при підвищенні температури (для низьколегованих сталей – 300-350 °С, леговані сталі – 400-700 °С). Відбувається оксидування внаслідок взаємодії молекул кисню з атомами підложки.

Фізичний процес початкового поверхневого окислювання металів обумовлений хемосорбцією кисню з повітря, що дає можливість атому кисню зблизитися з атомами металу настільки, що між ними виявляється можливим обмін валентними електронами (утворення іонного зв'язку). При цьому виникає початкова окисна плівка товщиною в декілька десятків часток нанометра. Надалі ця окисна плівка відіграє роль каталізатора процесу окислювання: хемосорбований на ній кисень приєднує електрони, емітовані металом у незначній кількості завдяки “тунельному ефекту”, у результаті чого на плівці виникає електричний заряд, що створює в ній напруженість поля 10^7 в/см. При впливі таких сильних електричних полів катіони металу дифундують через окисну плівку до поверхні і з'єднуються з киснем. Такий процес окислювання триває доти, поки товщина плівки не зросте до декількох десятків нанометрів, через що напруженість поля виявляється вже недостатньою для транспортування катіонів металу на поверхню і окислювання припиняється.

Здавна відомий спосіб оксидування, який називається *вороніння*, шляхом занурення нагрітих деталей у льняне масло. Деталі, що обробляються нагріваються в печі до температури 460 °С та занурюють на 5-10 хвилин у масло, повторюючи процес 4-5 разів, до отримання оксидної плівки чорного кольору. Внаслідок такої обробки на поверхні металу утворюється захисна плівка, що складається з оксиду заліза Fe_3O_4 .

18.2 Матеріали та обладнання

Муфельна піч; машинне масло; заготовки зі сталі; наждачний папір, аналітичні ваги; 10% розчин H_2SO_4 ; пінцет.

18.3 Порядок виконання роботи

- 18.3.1 Ознайомитись з інструкцією по техніці безпеки.
- 18.3.2 Зважити деталь до оксидування.
- 18.3.3 Провести оксидування сталюї заготовки.
- 18.3.3.1 Нагріти деталь до температури 460 °С та витримати 10 хв.
- 18.3.3.2 Вийняти заготовку з печі та занурити на 5 хв. у машинне масло.
- 18.3.3.3 Повторити п.п. 5.3.1 та 5.3.2 4-5 разів.
- 18.3.4 Провести зважування деталі після оксидування.
- 18.3.5 Розрахувати товщину оксидної плівки.
- 18.3.6 Оксидований зразок та зразок без захисного покриття опустити на 15 хвилин в розчин сірчаної кислоти, попередньо зваживши їх.
- 18.3.7 Після випробувань на антикорозійну стійкість зразки промити водою, висушити та провести їх зважування.
- 18.3.8 Розрахувати швидкість корозії двох зразків за формулою:

$$v = k/\rho, \quad (18.1)$$

де ρ – щільність матеріалу.

Параметр k розраховується за формулою:

$$k = (m_0 - m_1)/(F \cdot t) \quad (18.2)$$

де m_0, m_1 – маса зразка до та після випробувань;
 F – площа поверхні зразка, яка підлягала корозії;
 t – час корозії, років.

18.4 Зміст звіту

- 18.4.1 Назва роботи, мета і короткі теоретичні відомості.
- 18.4.2 Порядок виконання роботи.
- 18.4.3 Результати дослідів, висновки.

18.5 Контрольні запитання

- 18.5.1 Різновиди оксидування.
- 18.5.2 Механізм утворення шару оксиду на поверхні металу.
- 18.5.3 Области застосування оксидних покриттів.
- 18.5.4 Технологія термічного оксидування.
- 18.5.5 Сутність вороніння сталей.

19 Лабораторна робота №19

ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ ЗЧЕПЛЕННЯ ПОКРИТТІВ З ОСНОВОЮ

Мета роботи: Вивчення методики випробувань на міцність зчеплення нанесеного покриття.

19.1 Короткі теоретичні відомості

Вибір показника якості отриманих покриттів та методу контролю залежить в першу чергу від функцій покриття. Для визначення якості покриття може використовуватись вимірювання товщини, пористості, міцності, блиску покриття, залишкових напружень, теплоізоляційних та електричних властивостей, а також випробування зносостійкості, жаростійкості і корозійної стійкості, отриманих покриттів. У багатьох випадках головним показником якості покриття, яке повинно відповідати технічним вимогам, є його адгезія до основи. Вибір методу випробувань залежить від роду і форми покриття, основного металу, бажаної точності і тривалості вимірювань:

1. Метод витягування штифта (рисунок 19.1).

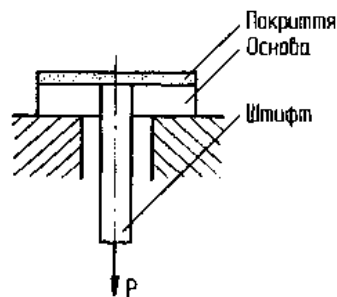
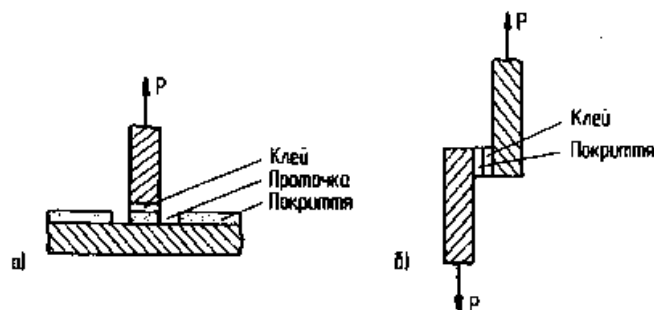


Рисунок 19.1 – Схема випробування на міцність зчеплення методом витягування штифта

2. Метод з використанням клею (рисунок 19.2).



а) – випробування на відрив; б) – випробування на зсув

Рисунок 19.2 – Схеми випробувань на міцність зчеплення покриття з основою з використанням клею

При методі витягування штифта, внаслідок наявності зазору між основою та штифтом, в покритті відбувається концентрація напружень, що призводить до його руйнування при більш низьких значеннях навантаження.

Товщина напиленого покриття при випробуванні з використанням клею повинна бути не менше 0,25 мкм і мати рівномірну товщину по всій поверхні. В якості клею використовують епоксидну смолу. Такий метод випробувань застосовується лише для покриттів, міцність зчеплення яких з основою не перевищує міцності клею. Цей метод більш точний, ніж метод витягування штифта.

19.2 Обладнання та матеріали

Лабораторна установка для визначення міцності зчеплення; лупа; зразки покриті захисним шаром міді, хрому або іншого матеріалу, нанесеного методом газополум'яного напилення, вакуумного та електрохімічного осадження.

19.3 Порядок виконання роботи

19.3.1 Ознайомитись з інструкцією по техніці безпеки.

19.3.2 Методом з використанням клею визначити міцність зчеплення покриттів з основою на зразках, отриманих на попередніх лабораторних роботах.

19.3.3 Провести необхідні розрахунки для визначення числового значення міцності.

19.3.4 Уважно оглянути зразки після випробувань і визначити місце руйнування.

19.3.5 Результати випробувань занести в таблицю:

№	Матеріал основи	Матеріал покриття	Вид нанесення покриття	Міцність зчеплення, МПа	Місце руйнування
---	-----------------	-------------------	------------------------	-------------------------	------------------

19.4 Зміст звіту

19.4.1 Назва роботи, мета та короткі теоретичні відомості.

19.4.2 Порядок виконання роботи.

19.4.3 Результати випробувань.

19.4.4 Аналіз отриманих результатів, висновки.

19.5 Контрольні запитання

19.5.1 Механізм утворення з'єднання покриття-основа.

19.5.2 Показники якості покриття.

19.5.3 Методи оцінки якості покриття.

19.5.4 Схеми визначення міцності зчеплення покриттів з основою.

19.5.5 Фактори, що впливають на міцність зчеплення покриття з основою.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Хасуи А., Мorigаки О. Наплавка и напыление. Пер. с яп. Москва: Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Борисов Ю. С., Борисова А. Л. Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техніка, 1986. 223 с.
3. Васильев М. А. Структура и динамика поверхности переходных металлов. Киев: Наукова думка, 1988. 248 с.
4. Никитин М. М. Технология и оборудование вакуумного напыления. Москва: Металлургия, 1992. 122 с.
5. Физика твердого тела: Энциклопедический словарь. В 2-х т. / гл. ред. В. Г. Барьяхтар. Киев: Наукова думка, 1998. 648 с.
6. Харламов Ю. О., Будаг'янц М. А. Фізика, хімія та механіка поверхні твердого тіла. Навчальний посібник. Луганськ: Вид-во СУДУ, 2000. 624 с.
7. Проценко І. Ю., Саєнко В. А. Тонкі металеві плівки (технологія, властивості): Навч. посібник. 2002. 187 с.
8. Сінковський А. С. Теорія та методи напылення: курс лекцій. Одес. нац. політехн. ун-т. Одеса: Наука і техніка, 2003. 171 с.
9. Кузнецов В. Д., Пащенко В. М., Ющенко К. А., Борисов Ю. С. Фізико-хімічні основи інженерії поверхні: Навч. посібник. Київ: ВІПОЛ, 2005. 372 с.
10. Анциферов В.Н., Горчаков А.И., Кривоносова Е.А., Матыгуллина Е.В., Ханов А.М. Теория и технология покрытий. Вакуумное конденсационное напыление покрытий Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 73 с.
11. Шиліна О. П., Осадчук А. Ю. Газотермічні методи напылювання покриттів. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2006. 103 с.
12. Дубовий О.М., Степанчук А.М. Технологія напылення покриттів Підручник. Миколаїв: Національний університет кораблебудування, 2007. 236 с.
13. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Інженерія поверхні. Київ: Наукова думка, 2007. 557 с.
14. Синани И. Л., Федосеева Е. М., Береснев Г. А. Методы нанесения покрытий. Учебное пособие. Пермь: Издательство Пермского государственного технического университета, 2008. 110 с.
15. Подопрігора Н. В., Садовий М. І., Трифонова О. М. Фізика твердого тіла: навчальний посібник. Кіровоград: ПП «Центр оперативної поліграфії «Авангард», 2014. 416 с.
16. Г. В. Похмурська, М. М. Студент, В. І. Похмурський. Газотермічні покриття: навчальний посібник. Львів, 2017. 180 с.