МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
спеціальності 131 Прикладна механіка
освітньо-професійної програми «Технології та устаткування зварювання»

ОБГОВОРЕНО І РЕКОМЕНДОВАНО
на засіданні кафедри технологій
зварювання та будівництва
Протокол №2 від 29.02.2024

Чернігів 2024

Інженерія поверхні. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 131 – Прикладна механіка, освітньо-професійної програми «Технології та устаткування зварювання». /Укл.: Новомлинець О.О., Болотов М.Г.– НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – 30 с.

Укладачі: Новомлинець Олег Олександрович, доктор технічних наук, професор;
Болотов Максим Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент

Відповідальний за випуск: Прибитько Ірина Олександрівна, завідувач кафедри технологій зварювання та будівництва, кандидат технічних наук, доцент

Рецензент: Ганєєв Тимур Рашитович, кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва, Національного університету «Чернігівська політехніка»

ЗМІСТ

Вступ..... 4

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……...…. 29

Рекомендована література.....……..... 30

ВСТУП

Методичні вказівки з описом лабораторних робіт з курсу «Інженерія поверхні» для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка, освітньо-професійної програми «Технології та устаткування зварювання».

Методичний посібник забезпечує можливість студентам перед виконанням роботи коротко повторити лекційний матеріал про основні фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів, про поверхневі явища, що відбуваються при зварюванні, паянні та нанесенні покриттів, про способи підготовки та очищення поверхні, про основні схеми вимірювання адгезії.

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. Визначати необхідний спосіб підготовки поверхонь перед зварюванням або паянням, в залежності від матеріалу, способу отримання нероз’ємних з’єднань та вимог до якості.
2. Визначати механізм утворення нероз’ємних з’єднань, в залежності від природи матеріалу, що зварюється.
3. Проводити підготовку поверхонь перед зварюванням та паянням.
4. Оцінювати якість підготовки поверхонь та нероз’ємних з’єднань.

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).

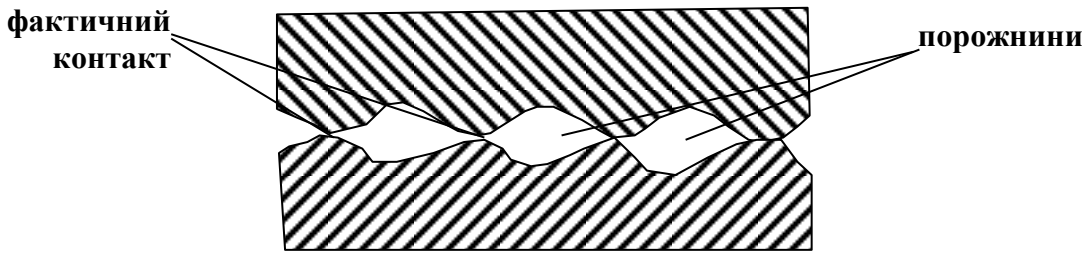


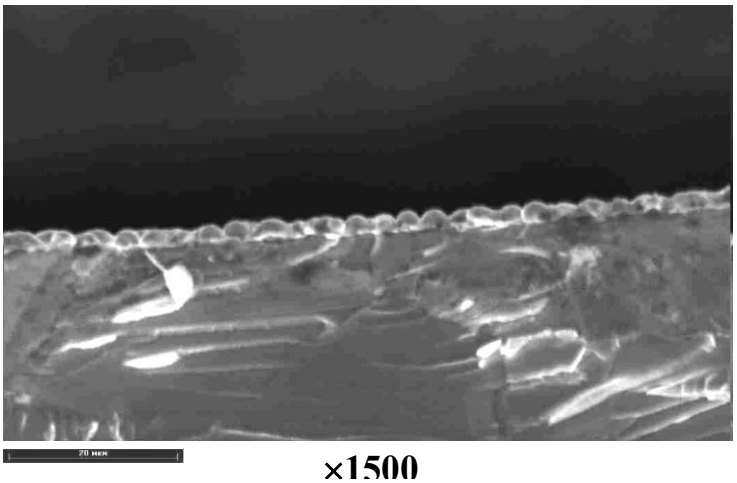
Рисунок 1.1 – Схема контактування шорстких поверхонь при зварюванні в твердій фазі до утворення фізичного контакту

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 різнорідних матеріалів відбувається сублімація одного з металів та його конденсація на поверхні іншого (рисунок 1.2).

Таким чином, внаслідок автовакуумування та сублімації, у стику 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 Х18Н10Т.

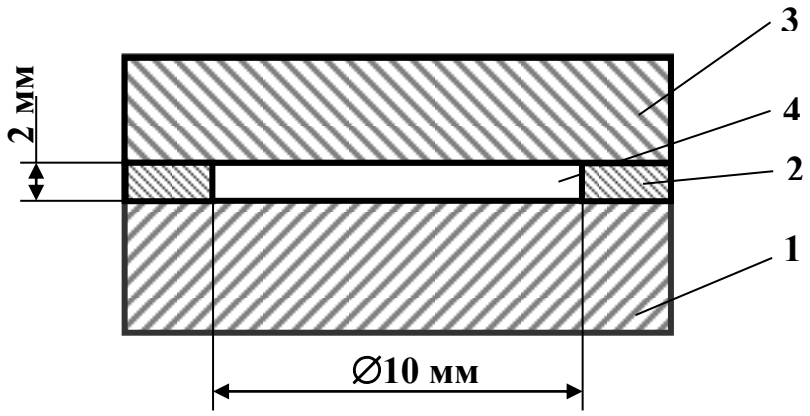
1.3.3 Досліджувані поверхні пластин 1, 3 попередньо відполірувати й знежирити ацетоном.

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 зборки так і період нагріву.

1.3.5 Завантажити збірку у муфельну піч та витримати протягом 15 – 20 хвилин при температурі 800-830 °С (пара Cu-Ti), 950-980 °С (пара Cu-Mo, Cr або Х18Н10Т).

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 пластини; 2 – кільце з міді; 3 – пластини з Ti, Cr, Mo або сталь Х18Н10Т; 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, реально ж натягу уздовж 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 надав би краплі сферичну форму, так як із усіх тіл рівного об'єму куля володіє мінімальною поверхнею. Виміряється в Дж/м^2 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:

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

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

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

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

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

$$\sigma_{т-г} > \sigma_{ж-г} + \sigma_{т-ж}\,. \qquad [2.2]$$

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 А и В, σ_{AB} – міжфазний натяг на границі між фазами А и В)* можна записати в такий спосіб:

$$W_a > 2\sigma_{ж-г}\,. \qquad [2.3]$$

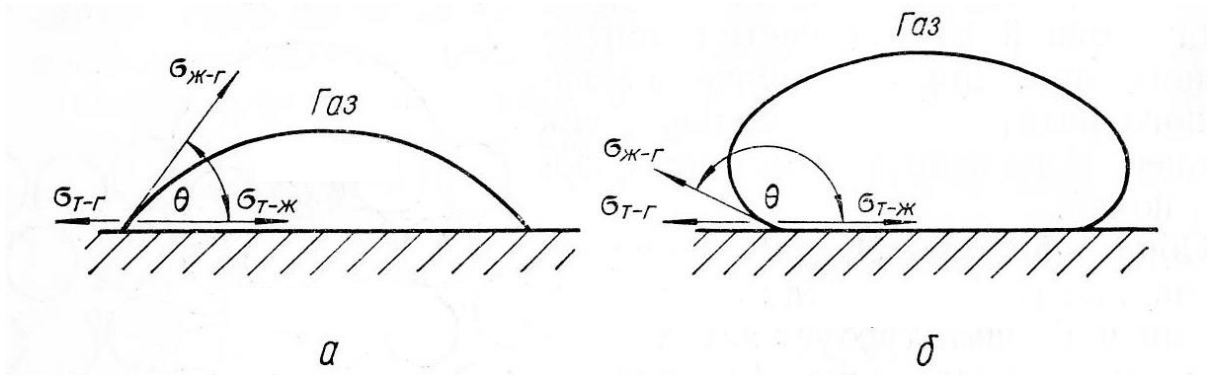


Рисунок 2.1 – Крапля рідини на поверхні твердого тіла: *а* – гарне змочування; *б* – погане змочування

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:

$$W_a = \sigma_{ж-г}\left(1 + \cos\theta\right). \qquad [2.4]$$

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:

$$\cos\theta = \left(\sigma_{т-Г} - \sigma_{т-ж}\right) / \sigma_{ж-Г}\,, \qquad [2.5]$$

або

$$\cos\theta = W_a / \sigma_{ж-г} - 1 . \qquad [2.6]$$

Таким чином, двома межами стану є повна відсутність змочування, коли $\theta = 180^0$ і повне змочування коли θ=0°. При 0° < θ < 180° 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:

$$\sigma_B \geq \sigma_A + \sigma_{A-B} . \qquad [2.7]$$

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

Розходження в поводженні змочувальної й незмочувальної рідин полягає в тому, що в змочувальної рідини проявляється тенденція до збільшення площі контакту із твердим тілом, а в незмочувальної - до зменшення цієї площі. Це пов'язане з тим, що в змочувальної рідини енергія, що доводиться на одиницю площі, поверхневого шару, що контактує із твердим тілом, менша, ніж енергія не контактуючого із твердим тілом поверхневого шару рідини. У незмочувальної рідини 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 розплаву, 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 металевого розплаву багато в чому залежить від зміни величини $\sigma_{Т\text{-}ж}$, причому істотний вплив на міжфазну енергію границі розділу й змочування твердого металу розплавом має хімічна взаємодія між контактуючими фазами.

З зростанням температури спостерігається зниження крайового кута змочування.

Істотний вплив на змочування твердих тіл металевим розплавом має газове середовище. Цей вплив особливо помітний в тому випадку, коли на границі із застосовуваним газом відбувається істотне зниження величини поверхневого натягу металевого 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 та обезжирити розчинником.

2.3.3 Вивести муфельну піч на потрібний режим нагріву (на 35-90 °С вище $Т_{пл}$ 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.

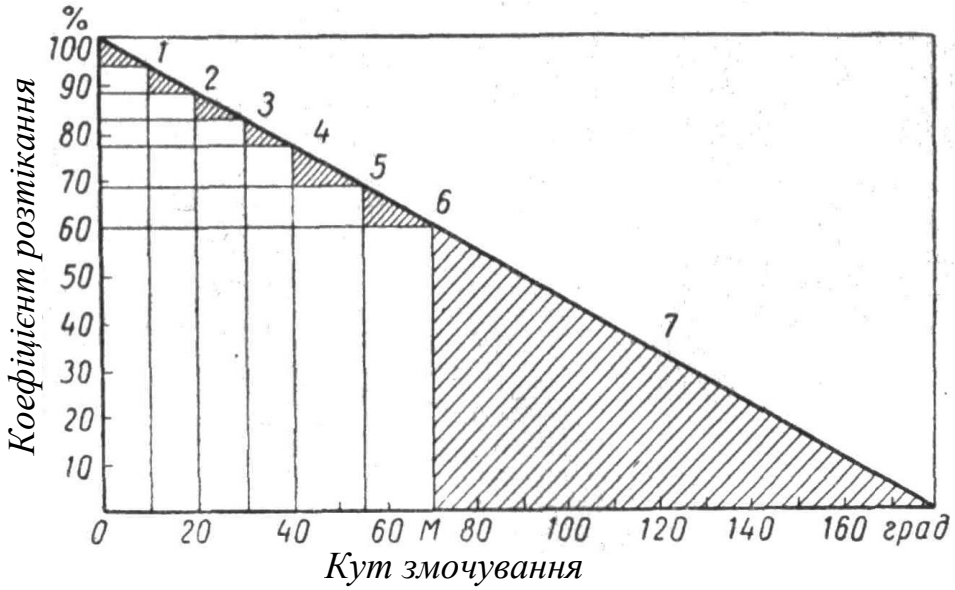
$$\gamma = \frac{D - H}{D} \times 100 . \qquad (2.8)$$

Діаметр каплі можне також розрахувати по формулі:

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

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

2.3.8 Провести аналогічні дослідження розтікання силуміну на поверхні титану при нагріві у вакуумній камері, 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 стального 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 $r_к$.

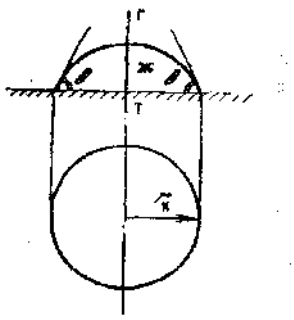


Рисунок 3.1 – Адгезія симетричної краплі на рівній**,** горизонтально розташованій поверхні

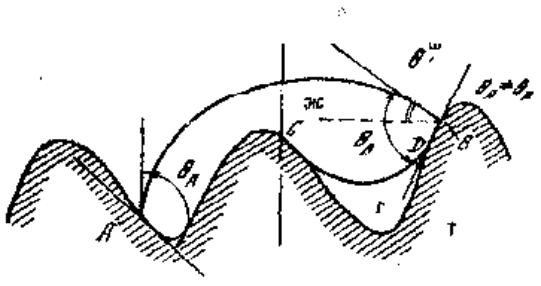


Рисунок 3.2 – Асиметрія форми краплі на шорсткій поверхні: θ_A ,θ_B – істинні краєві кути;$\theta^{Ш}$ – крайовий кут, що виміряється

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 убік виїмок поверхні. На шорсткій поверхні вимірюють кут нахилу сферичної краплі по відношенню до поверхні твердого тіла. Крайовий кут на шорсткій поверхні $\theta^{Ш}$ 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

$$S_k = \pi \cdot r_k^2 . \tag{3.1}$$

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:

$$R_\Delta = S_k^{/} / S_k , \tag{3.2}$$

де $S_k^{/}$ – площа контакту краплі із шорсткою поверхнею.

У цьому визначенні коефіцієнта R_Δ не враховано, що проникнення рідини у виїмки (рисунок 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:

$$\eta = S_k^{//} / S_k , \tag{3.3}$$

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:

$$R_\Delta^{/} = (S_k^{/} - S_k^{//}) / S_k . \tag{3.4}$$

Коефіцієнти R_Δ і $R_\Delta^{/}$ дають можливість визначити роботу адгезії рідини на шорстких поверхнях $W^{ш}_{ад}$ по відношенню до роботи адгезії на гладких поверхнях $W_{ад}$. Зв'язок між двома видами рівноважної роботи рідини дорівнює:

$$W_{ад}^{ш} = R_\Delta^{/} \cdot W_{ад} . \tag{3.5}$$

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 та обезжирити розчинником.

3.3.3 Вивести муфельну піч на потрібний режим нагріву (на 35-90°С вище $T_{пл}$ олова, 450-500°С).

3.3.4 Встановити сталеві зразки на столик муфельної печі і витримати його на протязі 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 різнорідних 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 спинами (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.

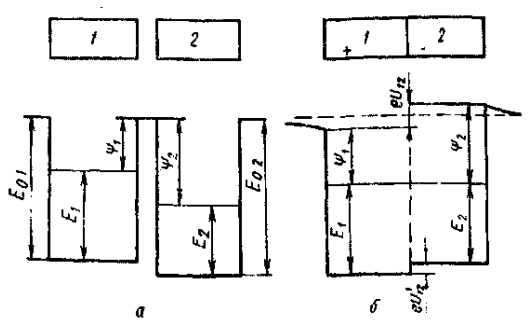


Рисунок 4.1 – Контакт двох металів з різними рівнями Фермі

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:

$$U_{12} = (E_1 - E_2)/2. \qquad (4.1)$$

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).

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

де n_1, і n_2 – концентрації електронів провідності;

T_1-T_2 – різниця температур гарячого й холодного спаїв.

Градієнт температури викликає дифузію більш швидких електронів до холодного кінця, а більше повільних - 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 мілівольтметру.
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 мілівольтметру 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

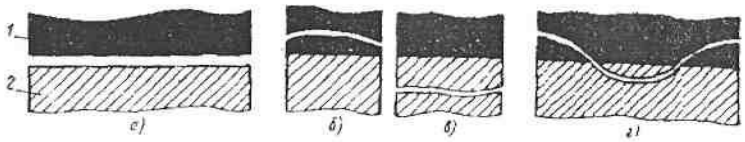
ОСНОВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ АДГЕЗІЇ

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 виміряється 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 адгезів цілком відділяється від субстрату, когезійне - коли руйнування відбувається по масиву адгезива або субстрату, і змішане - частково по адгезиву, частково по субстраті.



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.

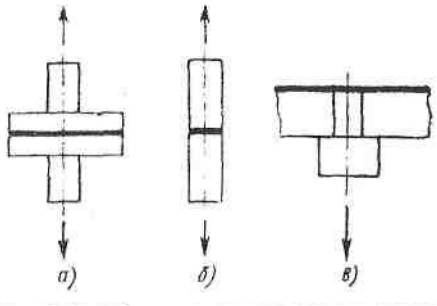


Рисунок 5.2 – Зразки для визначення адгезії методом рівномірного відриву

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 електро перетворювачів 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.

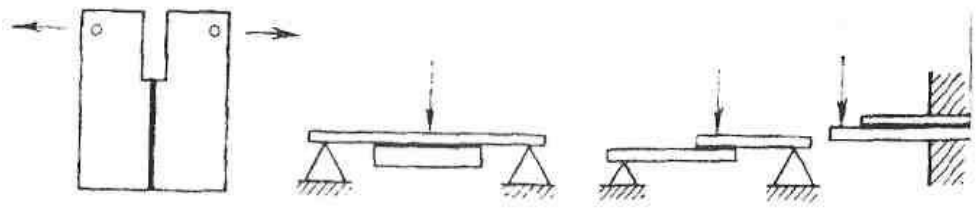


Рисунок 5.3 – Схеми випробувань на відшарування твердих матеріалів

Метод виміру адгезії зрушенням широко застосовується для адгезивов 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 заздалегідь 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 й т.д. Перевагу віддають гідравлічним навантажувачам, що забезпечують повільне прикладання зусилля з регульованою швидкістю.

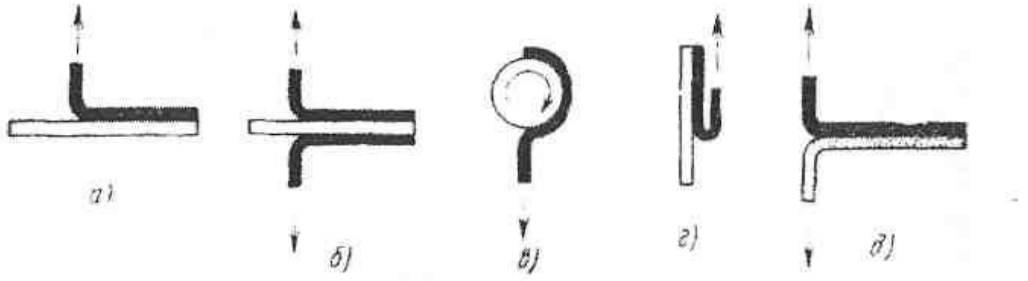


Рисунок 5.4 – Схеми випробувань на відшарування гнучких матеріалів від твердої основи під кутом 90° (а,б,в) і 160° (г) та на розшарування гнучких матеріалів (д)

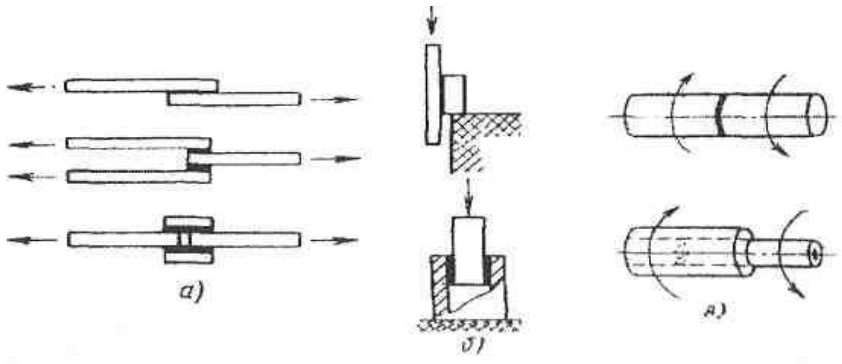


Рисунок 5.5 – Схеми випробувань на зрушення

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 та інші).

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 зі зварюємих поверхонь 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, газопламеневого або електроіскрового різання, піддаються очищенню перед розміщенням зразків у вакуумну камеру 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 $A1_2O_3$ із розміром часток 0,05-0,3 мкм.

Хімічне полірування може здійснюватися в киплячій царській горілці, а електрополірування – у розчинах NaOH; 90% H_2S0_4 – 10% HF; 60% HCI – 40% C_2H_5OH; 50% H_3PO_4 – 20% H_20 – 30% C_2H_5OH при щільності струму від 1 до 50 ма·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) і 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 й час витримки залежать від аналізованого металу й природи домішки, яку видаляємо, і підбираються

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

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

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

Для ряду металів $T_{мак} < T_{лл}$ ($T_{пл}$ – температура плавлення). Однак для багатьох систем метал-газ, зокрема метал-кисень, $T_{мак} \geq T_{лл}$, 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 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 ($T_{пл}$ < 1000 °С). Крім того, при високих температурах істотно змінюється розподіл домішок і дефектів у зразку. Ряд домішок, дифундуючи на поверхню, взаємодіє із залишковими газами й 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, роблять 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 й 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 з високотемпературними нагрівами 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.

Свіжоприготовлена 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 механічної поліровки.

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 на протязі 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 механічної поліровки 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 заготівок 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 3х3 мм зусиллям 200 кгс 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 заготівок рекомендується травлення у водному розчині концентрованої ортофосфорної кислоти (H_3PO_4) з добавкою 0,1-0,3% хромлика ($K_2Cr_2O_7$). Тривалість травлення 10-15 хвилин, далі сушка гарячим повітрям (Т = 70÷80°С). 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 приборами, 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 стискання їх. 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 точного 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 спотикання.

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.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛИТЕРАТУРА

1. Харламов Ю.О., Будаг'янц М.А. Фізика, хімія та механіка поверхні твердого тіла. Навчальний посібник. – Луганськ: Вид-во СУДУ, 2000. – 624 с.
2. Інженерія поверхні: підручник / К. А. Ющенко, Ю. С. Борисов, В. Д. Кузнецов, В. М. Корж. - Київ: Наукова думка, 2007. – 559 с.
3. Лузан С. О. Структура концепції відновного ремонту газотермічним напиленням покриттів / С. О. Лузан // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 1. – С. 163-169.
4. Лузан С.О. Забезпечення зносостійкості деталей газополум'яним напиленням покриттів з віброобробкою / С.О. Лузан // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків : 2011. – Вип. 114. – С. 196-202.
5. Корж В. М. Технологія та обладнання для напилення. Навчальний посібник. К.: НМЦ ВО. 2000. – 407 с
6. Кузнецов, В.Д. Фізико-хімічні основи створення покриттів [Текст] : Навч. посібник / В.Д. Кузнецов, В.М. Пащенко — К.: НМЦ ВО, 1999. —176 с
7. Квасніцький, В. В. Паяння матеріалів. Дослідження фізико-хімічних процесів та технологічних факторів паяння [Текст] : навчальний посібник / / В.В. Квасніщький, В. Ф. Квасницький, Б.В. Бугаєнко, Г.В. Єрмолаєв; Під наук. ред. В. Ф. Квасницького. - Миколаїв: НУК, 2006. - 160 с.
8. Baptista, A.; Silva, F.; Porteiro, J.; Míguez, J.; Pinto, G. Sputtering Physical Vapour Deposition (PVD) Coatings: A Critical Review on Process Improvement and Market Trend Demands. *Coatings* 2018, *8*, 402.