

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

КОРОЗІЯ ТА ЗАХИСТ МЕТАЛІВ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»
спеціальності 132 Матеріалознавство

Укладачі: В. Ж. Шемет, Л. О. Бірюкович, М. Я. Втеркоський

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2025

УДК 620.197

X 46

Укладачі:

Шемер Володимир Жданович, канд. хім. наук, ст. викл.
Бірюкович Ліна Олегівна, канд. техн. наук, доцент
Втерковський Михайло Ярославович, PhD, ст. викл.

Рецензенти

Уманський Олександр Павлович, зав. відділу Матеріалознавства та інженерії поверхневих шарів ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України, проф., д. т. н.

Коновал Володимир Павлович, с. н. с. відділу Матеріалознавства та інженерії поверхневих шарів ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України, с. н. с., к. т. н.

Відповідальний
редактор

Богомол Юрій Іванович, член.-кор. НАН України, професор, докт. техн. наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 05.03.2026 р.)
за поданням вченої ради НН ІМЗ ім. Є. О. Патонау
(протокол № 2 від 24.02.2026 р.)*

Корозія та захист металів. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів» спец. 132 Матеріалознавство / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. Ж. Шемер, Л. О. Бірюкович, М. Я. Втерковський. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 55 с.

У навчальному посібнику наведено методичні матеріали лабораторного практикуму дисципліни «Корозія та захист металів». Лабораторний практикум складається з восьми лабораторних робіт. До кожної лабораторної роботи наведено короткі теоретичні відомості щодо тематики роботи, вказівки до виконання дослідів, рекомендації щодо обробки їх результатів та контрольні питання. У лабораторних роботах основний акцент зроблено на розвиток навичок самостійної роботи здобувачів, значна частина якої виконується на рівні навчання через дослідження.

Також у навчальному посібнику наведено заходи безпеки під час проведення лабораторних робіт та вимоги до оформлення звіту з лабораторної роботи та порядок його подання.

Навчальний посібник призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів» спеціальності 132 Матеріалознавство та може бути рекомендовано для закладів вищої освіти України, у яких здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

Реєстр. № НП 25/26-244. Обсяг 2,5 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
ВСТУП.....	6
ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ...	11
ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ ТА ПОРЯДОК ЙОГО ПОДАННЯ.....	14
Лабораторна робота № 1. КІНЕТИКА ІЗОТЕРМІЧНОГО ОКИСНЕННЯ МЕТАЛУ НА ПОВІТРІ	16
Лабораторна робота № 2. ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ШВИДКІСТЬ ОКИСНЕННЯ МЕТАЛІВ НА ПОВІТРІ	23
Лабораторна робота № 3. ЖАРОСТІЙКІСТЬ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ НА ПОВІТРІ	27
Лабораторна робота № 4. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ХІМІЧНОЇ КОРОЗІЇ ОБ'ЄМНИМ МЕТОДОМ	31
Лабораторна робота № 5. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ КОРОЗІЇ МАСОВИМ МЕТОДОМ.....	37
Лабораторна робота № 6. ЕЛЕКТРОЛІТИЧНЕ НІКЕЛЮВАННЯ МІДІ.....	41
Лабораторна робота № 7. АНОДНЕ ОКСИДУВАННЯ АЛЮМІНІЮ.....	46
Лабораторна робота № 8. СПОВІЛЬНЕННЯ КОРОЗІЇ СТАЛІ В КИСЛОТАХ МЕТОДОМ ОБРОБКИ АГРЕСИВНОГО СЕРЕДОВИЩА.....	50
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	53
ДОДАТОК А	54

ПЕРЕДМОВА

Сучасна цивілізація не може існувати без металів і сплавів, при цьому корозія це їх ахіллесова п'ята. Хоча явище корозії таке ж давнє, як і сама історія металів, активні дослідження почалися лише в минулому столітті. Треба зауважити, що лише за останні шість десятиліть наука про корозію поступово перетворилася на чітко визначену дисципліну. Курс із корозії зараз є невід'ємною частиною навчальної програми у провідних технічних університетах світу. Стрімкий прогрес у матеріалознавстві металів і сплавів у новому тисячолітті сприяв підвищеному попиту на курси із корозії і виданню нових підручників. У свій час Evans U. P. [1], Kofstad P. [2] та Birks N., Meier G. H., Pettit F. S. [3] написали класичні підручники, які охоплювали основи науки про корозію. Протягом багатьох десятиліть не одне покоління студентів і науковців вчилось на цих фундаментальних роботах. За останні роки було видано кілька нових книг щодо теорії захисту від корозії, які відповідають потребам студентів технічних університетів. Так, наприклад, Yung D. [4] видав фундаментальну монографію щодо високотемпературної корозії металів і сплавів для науковців, інженерів та студентів, які вивчають основи матеріалознавства.

Майже всі метали та сплави, що представляють технологічний інтерес, окислюються та кородують, як за високих температур, так і в розчинах електролітів за нормальної температури. Однак природа продуктів реакції та швидкість, з якою руйнуються металеві поверхні, дуже різняться.

Термін “окислення” використовується в загальному вигляді для будь-якої хімічної реакції, яка збільшує ступінь окислення металу шляхом утворення стійких сполук, таких, як оксиди, сульфіді, карбіді тощо. Реакції окислення сплаву можна розглядати, як такі, що відбуваються у декілька стадій. Спочатку всі компоненти сплаву, що контактують з гарячим газом, можуть реагувати одночасно. Згодом термодинамічно більш стабільні сполуки замінюють менш стабільні, і система сплав–газ локально наближається до стану майже рівноваги. Тому систему, що реагує, можна представити як серію

просторово-суміжних локальних рівноважних станів, які поступово змінюються залежно від хімічних потенціалів її реагентів.

Розуміння цих процесів є ключовим для правильного вибору матеріалів, прогнозування тривалості експлуатації та розробки ефективних методів захисту від корозії. У подальших розділах розглядаються основні механізми окислення та електрохімічної корозії, а також практичні способи зменшення інтенсивності цих процесів в реальних умовах експлуатації конструкцій і обладнання.

ВСТУП

Корозією називають процес руйнування металевих матеріалів під час їх хімічної або електрохімічної взаємодії з навколишнім середовищем. Під металами тут і далі будемо розуміти чисті метали, інтерметалічні сполуки і сплави на їх основі, металеві вироби і конструкції. За високих температур деталі і вузли виготовлені з кераміки на основі тугоплавких сполук, також піддаються корозії. Середовищем, в якому відбувається корозія металів, як правило є гази або рідини. Корозійний процес протікає на границі розділу двох фаз: тверде тіло–навколишнє середовище, тобто є гетерогенним. В індустріальних країнах з розвинутою промисловістю втрати від корозії становлять до 5 % від внутрішнього валового продукту (ВВП) [5].

Економічні втрати від корозії можуть бути, як прямими так і непрямыми. До *прямих втрат* можна віднести амортизаційні витрати на заміну обладнання, що виходить з ладу, витрати на профілактичний ремонт, здійснення заходів по боротьбі з корозією (використання більш дорогих металевих і неметалевих матеріалів, нанесення різних захисних покриттів, створення захисної атмосфери тощо).

До *непрямих втрат* відносяться втрати, викликані простоями через передчасний вихід із ладу обладнання в наслідок корозії, втрата продукції або її псування продуктами корозії, енергетичні втрати, що викликані меншою тепло- та електропровідністю продуктів корозії у порівнянні з металами.

Крім того, *корозійні втрати* можна розділити на такі, що можна *відновити* й *невідновлювані*. До *відновлюваних корозійних втрат* відноситься металобрухт, а також шматки продуктів корозії, які можуть бути повернуті до металургійного переділу (наприклад, окалина, що утворюється на нагрітому металі під час термообробки або обробки тиском). До невідновлюваний корозійних втрат – дисперсні продукти корозії, які розсіюються в атмосфері, ґрунті, воді, тобто губляться безповоротно.

Для правильного вибору методів боротьби із корозією необхідно мати чітке уявлення щодо об'ємів втрат під час корозії, а також щодо *механізм*

корозійних процесів та факторів, які впливають на швидкість корозії. Захист металів від корозії важливий не тільки для економії металофонду, але і для запобігання надзвичайних ситуацій, що можуть бути викликані руйнуванням металоконструкцій.

Корозійні процеси класифікують за механізмом взаємодії металів із зовнішнім середовищем; за видом корозійного середовища і умовами протікання процесу; за характером корозійних руйнувань; за видом додаткових дій, яким піддають метал одночасно з дією корозійного середовища.

За механізмом процесу розрізняють хімічну і електрохімічну корозію металів.

Хімічна корозія – це процес взаємодії металу з корозійним середовищем, під час якого окислення металу і відновлення окисненого компоненту середовища протікають одночасно і в одному акті. Продукти взаємодії просторово не розділені [5].

Електрохімічна корозія – це процес взаємодії металу з корозійним середовищем (розчином електроліту), під час якого іонізація атомів металу і відновлення окисненого компоненту корозійного середовища проходять не в одному акті і їх швидкості залежать від електродного потенціалу [6].

Газова корозія – це хімічна корозія металів у газовому середовищі за мінімального вмісту води (як правило, не більше 0,1 %) чи за високих температур [5].

Атмосферна корозія – це корозія металів у атмосфері повітря чи будь-якого газу.

Підземна корозія – це корозія металів у ґрунті [5], [6].

Біокорозія – це корозія металів, що протікає під впливом життєдіяльності мікроорганізмів.

Контактна корозія – це вид корозії, викликаний контактом металів, які мають різні стаціонарні потенціали в данному електроліті [5].

Радіаційна корозія – це вид корозії, обумовлений дією радіоактивного випромінювання.

Корозія зовнішнім струмом і блукаючим струмом. У першому випадку – це корозія металу, що виникає під дією струму від зовнішнього джерела. У другому – під дією блукаючого струму [5].

Корозія під напруженням – корозія, що викликана одночасною дією корозійного середовища і механічних напружень. Якщо це напруження від розтягу, то може відбутися розтріскування металу. Це дуже небезпечний вид корозії особливо для конструкцій, що зазнають механічних навантажень (ваги, ресори, автоклави, парові котли, турбіни тощо).

Циклічні напруження, що розтягують металеві вироби, можуть викликати їх корозійну втому. Відбувається зниження границі втоми металу. Такому виду корозії піддаються ресори автомобілів, канати, валки прокатних станів.

Корозійна кавітація – руйнування металу, яке обумовлене одночасними корозійними і ударними діями зовнішнього середовища.

Фреттінг-корозія – це корозія, яка викликана одночасно вібрацією і дією корозійного середовища.

Усунути корозію під час тертя чи вібрації можливо правильним вибором конструкційного матеріалу, зниженням коефіцієнту тертя, застосуванням покриттів тощо.

За *характером зміни поверхні металу* чи сплаву розрізняють декілька видів корозійних руйнувань (рис. 1).

Корозія називається *суцільною* (рис. 1а і 1б), якщо вона охоплює усю поверхню металу. Суцільна корозія може бути *рівномірною* (рис. 1а), якщо процес протікає з однаковою швидкістю по усій поверхні металу, і *несуцільною* (рис. 1б), коли швидкість процесу неоднакова на різних ділянках поверхні. Прикладом рівномірної корозії є іржавіння залізних труб на повітрі.

Під час *вибіркової корозії* (рис. 1в) руйнується одна структурна складова чи один компонент сплаву (наприклад, графітізація чавуну чи знецинкування латуней) [7].

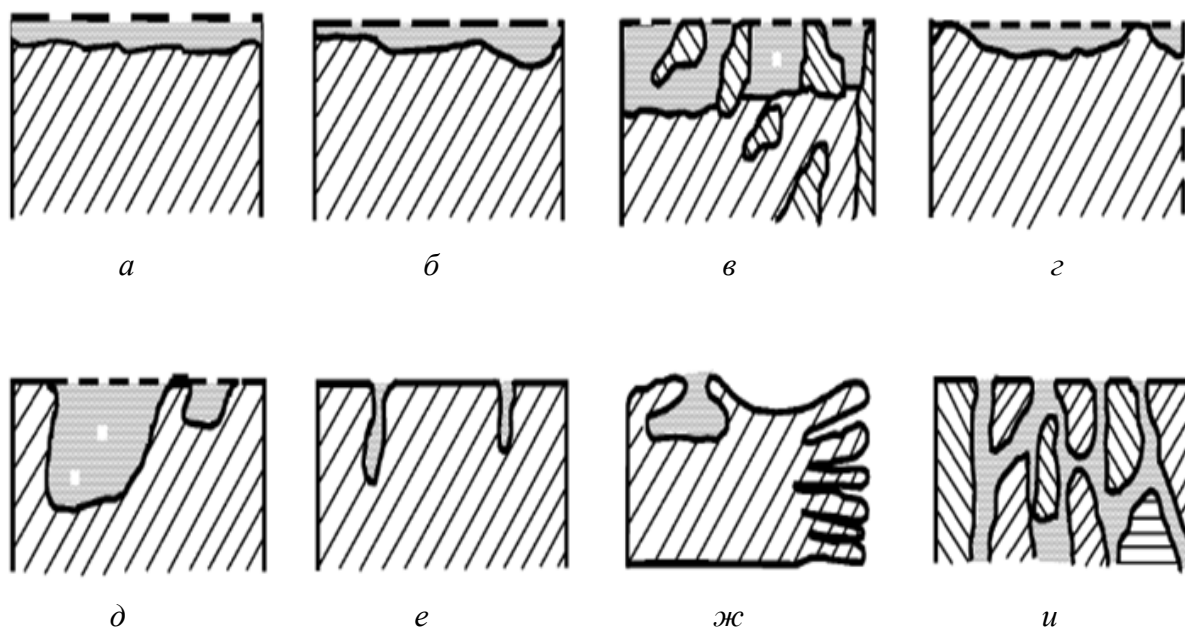


Рис. 1. Види корозії: *а* – суцільна рівномірна; *б* – суцільна нерівномірна; *в* – структурно-вибіркова; *г* – плямами; *д* – виразками; *е* – точками (пітінгова); *ж* – під поверхнева; *и* – міжкристалітна [1]

Місцева (локальна) корозія охоплює окремі ділянки поверхні металу (рис. 1г, 1д, 1е). Місцева корозія може виглядати, як окремі плями, які не надто заглиблені у товщу металу (рис. 1г); як виразок – руйнування, які мають вид раковин, що сильно заглиблені у товщу металу (рис. 1д) або точок (пітінгів), глибоко заглиблених у метал (рис. 1е).

Перший вид (місцева у вигляді плям) спостерігається, наприклад, від час занурення латуні у морську воду. Виразкова корозія відмічається у сталей у ґрунті, а пітінгова – у аустенітних хромонікелевих сталей у морській воді.

Поверхнева корозія (рис. 1ж) починається на поверхні, але потім поширюється у глиб металу. Продукти корозії виявляються зосередженими у порожнинах металу. Цей вид корозії викликає випинання і розшарування металевих виробів.

Міжкристалічна корозія (рис. 1и) характеризується руйнуванням металу по границям зерен. Вона особливо небезпечна тим, що зовнішній вигляд металу не змінюється, але він швидко втрачає міцність і пластичність та легко руйнується. Пов'язано це із утворенням між зернами рихлих

маломіцних продуктів корозії. Цьому виду корозії особливо піддаються хромисті і хромонікелеві сталі, нікелеві і алюмінієві сплави.

Щілинна корозія викликає руйнування металу під прокладками, у зазорах, різьбових кріпленнях тощо.

ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

1. Інструктаж з техніки безпеки та його реєстрація в спеціальному журналі проводиться на першому занятті викладачем, який веде лабораторні заняття.

2. Для виконання лабораторних робіт група студентів ділиться на бригади, чисельність і склад яких визначаються умовами виконання лабораторних робіт та кількістю студентів у групі.

3. Перебуваючи в лабораторії потрібно дотримуватись таких правил:

- 1) суворо дотримуватись навчальної дисципліни;
- 2) знати своє робоче місце;
- 3) не класти особистих речей на лабораторний стіл, а заносити їх у спеціально визначені місця;
- 4) не вживати їжу та не пити воду під час роботи;
- 5) кожний реактив, прилад, склянка, пристрій для роботи повинні мати своє постійне місце. Після закінчення роботи установку потрібно привести в початкове положення. Все приладдя до установки потрібно покласти на своє місце, посуд вимити;
- 6) не можна залишати навіть на короткий час хімічні реактиви, різні проби, промивні води або розчини без етикеток в місцях для них не визначених, оскільки це може призвести до важких нещасних випадків;
- 7) легкозаймисті рідини, органічні розчинники (бензин, бензол, ацетон, ефір, чотирихлористий вуглець тощо) берегти від вогню; для знежирювання зразків використовувати невеликі дози цих речовин і негайно закривати склянку пробкою;
- 8) роботи, які пов'язані з використанням солей хромової кислоти, концентрованих кислот і лугів, виконувати тільки у витяжних шафах, обладнаних спеціальною вентиляцією;
- 9) для переливання розчину з посудини до посудини користуватися лійками і не розливати рідини; лійки, мензурки, вимірювальні циліндри після

використання промивати водою під краном; під час набирання піпеткою або бюреткою реактивів (кислот, лугів і розчинів солей) користуватися гумовою грушею або шприцем; категорично забороняється набирати розчини у піпетку за допомогою рота. Невиконання цих правил може призвести до важких опіків і отруєнь;

10) ні в якому разі не слід куштувати речовину або визначати її запах, наближуючи ніс до колби, склянки або іншої посудини. Для розпізнання речовини за запахом потрібно перебувати від відкритої посудини на відстані від 0,2 м до 0,3 м і змахуванням руки наблизити до носа леткі пари рідини;

11) під час складання розчинів кислот або їх сумішей користуватись захисними окулярами. Щоб запобігти розбризкуванню, потрібно важку рідину вливати до більш легкої (кислоту – в воду, сірчану кислоту – до азотної тощо); змішувати гарячу кислоту або луг з гарячою водою цілком неприпустимо, оскільки виникає бурхливий викид рідини з посудини;

12) рідину, розливу на стіл або на підлогу, негайно видаляти сухою ганчіркою, а потім ганчіркою, рясно змоченою водою, захистивши руки гумовими рукавичками;

13) опіки отримані від кислот та лугів слід якнайшвидше ретельно (протягом від 10 хв до 15 хв) промити струменем чистої води. За потреби вражені ділянки шкіри нейтралізувати слабким розчином соди (3 %-м Na_2CO_3), якщо потрапила кислота або слабким розчином оцтової кислоти (3 %-м CH_3COOH), якщо потрапив луг; бризки кислот, які потрапили на одяг, потрібно нейтралізувати гідроксидом амонію, а бризки розчинів лугів – 2 %-м розчином оцтової кислоти;

14) краплі хромового електроліту (хромової кислоти, солей хромової кислоти), що потрапили на шкіру, потрібно терміново змити водою, якщо ж утворилися бурі плями, їх потрібно відмити розчином, який складається з однієї частини спирту, однієї частини соляної кислоти та двох частин води;

15) щоб запобігти опікам, не можна брати голими руками неостужені тиглі, зразки тощо.

16) категорично забороняється вмикати або вимикати електричні рубильники або вимикачі мокрими руками;

- 17) про всі нещасні випадки потрібно негайно повідомляти викладача;
- 18) аптечка, яка містить потрібні медикаменти для надання першої допомоги потерпілим знаходиться у завідувача навчальною лабораторією кафедри.

ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ ТА ПОРЯДОК ЙОГО ПОДАННЯ

Студенти повинні підготуватись до лабораторної роботи завчасно, до початку заняття в лабораторії. Під час підготовки необхідно ознайомитись з метою роботи, методичними рекомендаціями до виконання, порядком виконання роботи. Рівень підготовки студента до виконання лабораторної роботи перевіряє викладач на початку заняття.

Для допуску до лабораторної роботи кожен студент повинен мати у роздрукованому вигляді протокол лабораторної роботи. Чітко виконуючі наведені у протоколі інструкції, студент проводить дослідження та заносить отримані первинні результати до відповідних таблиць. Після проведення всіх передбачених завданням вимірювань та розрахунків результати аналізуються, порівнюються з очікуваними та пред'являються викладачу. Завдання вважається виконаним тільки після наведення порядку на робочому місці.

На основі первинних даних робляться відповідні розрахунки з використанням наведених формул в протоколі. Результати також вносяться до таблиць у протоколі. Кінцеві результати за необхідності використовуються для побудови відповідних графіків. Графічні залежності заносяться до протоколу лабораторної роботи.

Аналіз отриманих результатів наводиться в обговорення результатів, після чого робляться висновки. Захист лабораторної роботи здійснюється у визначений викладачем час.

Звіт кожен студент оформлює самостійно до початку наступної роботи. Звіт повинен містити титульний аркуш, на якому вказано номер та тему роботи, список виконавців (бригади), дати виконання та прізвище студента, який підготував звіт. Зміст звіту визначається відповідним розділом в методичних вказівках до виконання лабораторної роботи. У звіті обов'язково відображаються: мета роботи, використане обладнання та інструмент, результати експерименту з необхідними розрахунками. У кінці роботи необхідно зробити висновки, в яких наводиться аналіз результатів експерименту, розкрита фізична сутність отриманих результатів.

Лабораторні роботи студенти захищають індивідуально у встановлений термін, як правило, на наступному занятті. Під час захисту лабораторної роботи студент повинен знати мету та хід виконання лабораторної роботи, фізичну сутність процесів дослідження та їх теоретичне обґрунтування, вміти пояснювати та аналізувати отримані результати.

Оцінювання виконується згідно рейтинговій систему оцінювання наведеної у силабусі дисципліни і складеної відповідно до [Положення про систему оцінювання результатів навчання в КПІ ім. Ігоря Сікорського](#).

Лабораторна робота № 1. КІНЕТИКА ІЗОТЕРМІЧНОГО ОКИСНЕННЯ МЕТАЛУ НА ПОВІТРІ

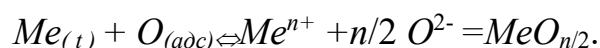
Мета роботи

Встановити закон росту оксидної плівки під час окиснення досліджуваного металу на повітрі за високої температури і визначити сталі коефіцієнти рівняння, що виражають знайдену залежність.

Загальні теоретичні відомості

Процес окиснення металу на повітрі за високих температур називається газовою корозією, на процес якої впливає наявність оксидних плівок на поверхні металу [1]–[4]. Механізм утворення оксидної плівки складається з таких етапів:

- 1) адсорбції окислювального компонента середовища (O_2 , H_2O , CO_2 , SO_2 , Cl_2) на поверхні металу [8];
- 2) хімічної взаємодії між металом та окислювачем із перебудовою атомів металу та кисню, що відповідає їх просторовому розподілу в оксиді [3]–[5].



При цьому спочатку утворюється мономолекулярний, а потім полімолекулярний шар оксиду. Надалі атоми кисню дифундують через шар оксиду, а в протилежному напрямку в нього дифундують іони металу. Реагуючи з киснем, іони металу утворюють оксид, тобто товщина плівки збільшується.

Розрізняють три групи плівок, що утворюються на металі в залежності від їх товщини: *тонкі* (невидимі), товщина яких до 40 нм; *середні* (що дають кольори мінливості), товщина яких від 40 нм до 500 нм; *товсті* (видимі), товщина яких більше 500 нм (окалина на металі). Закон росту оксидної плівки у часі значною мірою залежить від її захисних властивостей, критерієм

захисних властивостей оксидної плівки є відношення об'єму оксиду $V_{\text{ок}}$ до об'єму металу $V_{\text{мет}}$, використаного на створення оксиду. За умови $V_{\text{ок}}/V_{\text{мет}} < 1$ захисні властивості у плівки відсутні [1]–[3].

Під час утворення плівок, що не мають захисних властивостей, наприклад, несучільних, швидкість окислення є сталою (не залежить від товщини пористої плівки, що утворюється) і контролюється хімічною реакцією утворення плівки з металу та кисню, що є найповільнішою стадією процесу (кінетичний контроль). В цьому разі спостерігається лінійний закон росту плівки:

$$\Delta m = K_{\text{л}} \tau,$$

де Δm – питоме збільшення маси зразка, $\text{мг}/\text{см}^2$;

$K_{\text{л}}$ – лінійна константа швидкості реакції окислення, $\text{мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{год})$;

τ – час окислення металу, год .

У суцільних плівок, які мають захисні властивості, швидкість росту звичайно визначається дифузією реагентів (дифузійний контроль). Процес характеризується самогальмуванням: в міру стовщення плівки зменшується швидкість дифузії через неї реагентів (металу та кисню), отже і швидкість окислення. В цьому разі плівка може рости за параболічним законом [3]:

$$\Delta m^2 = K_{\text{п}} \tau, \tag{1.1}$$

де $K_{\text{п}}$ – параболічна константа швидкості реакції окислення, $\text{мг}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{год})$.

Якщо швидкість росту плівки контролюється і швидкістю хімічної реакції, і швидкістю дифузії через плівку реагентів (мішаний дифузійно-кінетичний контроль), то ріст плівки може бути описаний квадратичним рівнянням Еванса [1]:

$$K_{\text{п}}\Delta m^2 + K_{\text{л}}\Delta m = K_1 K_{\text{п}}\tau.$$

В реальних процесах окислення металу можуть бути порушені залежності $\Delta m = f(\tau)$ внаслідок дії деяких факторів, що ускладнюють процес (порушення суцільності плівки внутрішніми напруженнями, що виникають під час росту захисної плівки, утворення багатошарових плівок під час окислення металів змінної валентності та сплавів тощо). У цих випадках спостерігаються складніші залежності, що описують процес росту оксидної плівки.

На основі дослідних даних про зміну маси зразка у часі можна одержати рівняння, яке дає змогу скласти уявлення про механізм процесу, виявити головну ланку процесу, розрахувати корозійне руйнування металу під час його ізотермічного окиснення як функцію часу.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи та обробки результатів експерименту

Устаткування, прилади, матеріали. Муфельна піч (рис. 1.1а); 6 маркованих пластин; 6 тиглів; штангенциркуль (1.1б); рукавички (1.1в); захисні окуляри (рис. 1.1г); пінцет (рис. 1.1д); наждачний папір; органічний розчин; фільтрувальний папір; електронні аналітичні ваги (рис. 1.1е).



Рис. 1.1. Прилади і матеріали для виконання лабораторної роботи: а – муфельна піч; б – штангенциркуль; в – рукавички; г – захисні окуляри; д – пінцет; е – електронні аналітичні ваги

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи. Завдання лабораторної роботи є дослідження кінетики окислення даного металу або сплаву на повітрі за заданої температури.

Випробуванню піддають 6 маркованих зразків – пластин, виготовлених з одного і того ж металу або сплаву. Досліджувані зразки зачищають наждачним папером і визначають штангенциркулем їх розміри з точністю до 0,1 мм для знаходження площі поверхні. Далі зразки знежирюють органічним розчином, витирають фільтрувальним папером і зважують на аналітичних вагах з точністю до 0,0002 г. Результати вимірювань заносять до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Параметри зразків

Номер зразка	Початкова маса зразка m_0 , г	Розміри зразка, см	Реакційна площа зразка S , см^2

Підготовлені таким чином зразки вміщують у відкриті тиглі з вогнетривкого металу та завантажують до муфельної печі (рис. 1.2), нагріту до заданої температури. Температура печі підтримується сталою протягом дослідів регулюючим приладом.

Через заданий викладачем інтервал часу (від 15 хв до 20 хв) тигель з першим зразком закривають кришкою (щоб запобігти втраті частини окалини, шматочки якої під час охолодження зразків часто від них відокремлюються), витягають щипцями з печі і ставлять на лист азбесту. Після охолодження на повітрі тиглі з кришками вміщують до ексикатора над прожареним хлористим кальцієм для остаточного охолодження. Після цього кожний зразок зважують разом з тиглем, а потім зважують порожній тигель.

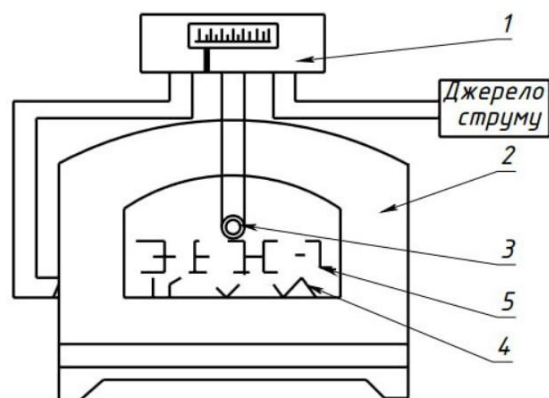


Рис. 1.2. Схематичне зображення установки для випробування металів на газову корозію в атмосфері повітря: 1 – терморегулятор; 2 – муфельна піч; 3 – термопара; 4 – підставка для тиглів; 5 – тиглі з досліджуваними зразками

Цю операцію повторюють з інтервалом від 15 хв до 20 хв з кожним зразком, що залишився у печі.

Результати вимірювань заносять в таблицю 1.2.

Таблиця 1.2. Результати експерименту

Номер зразка	Час витримки зразка в печі, хв	Маса зразка з тиглем, г	Маса тигля, г	Маса зразка m_{τ} , г	$(m_{\tau}-m_0)/S$, мг/см ²

Обробка результатів експерименту. На основі отриманих даних будують графіки залежності питомої зміни маси зразка в нормальних координатах $\Delta m/S = f(\tau)$ (рис. 1.3а) і в логарифмічних (рис. 1.3б).

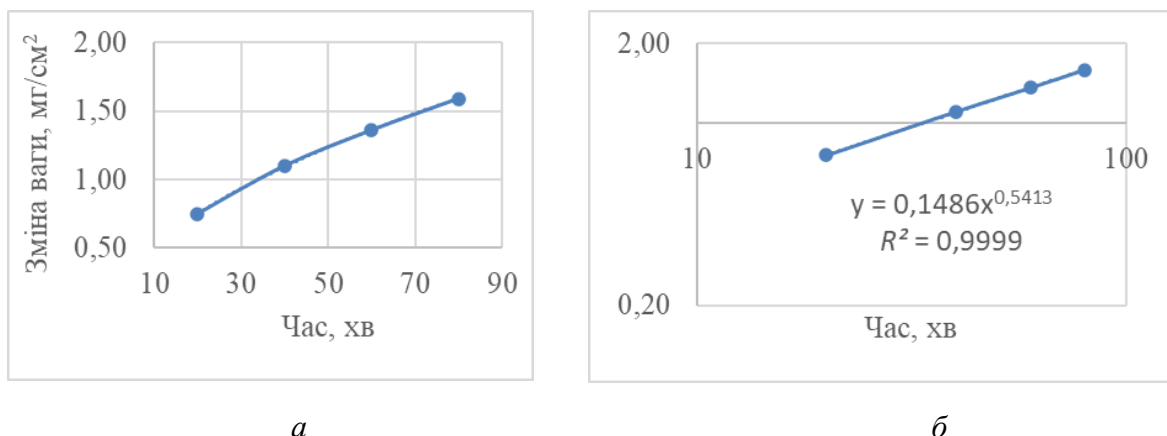


Рис. 1.3. Кінетика окислення зразка металу: *а* – в нормальних координатах; *б* – в логарифмічних координатах

За допомогою графічного диференціювання (табл. 1.3) знаходять константи рівняння окислення, K_n та n , наприклад:

$$(\Delta m/S)^n = K\tau,$$

$$K_n = 0,1486; n = 0,5413.$$

Таблиця 1.3. Функціональна сітка для прямолінійного перетворення

Рівняння	Функціональна сітка для прямолінійного перетворення
$y^n = ax$	$\lg y = f(\lg x)$

Також графічним методом знаходять середньоквадратичну похибку R (рис. 1.4).

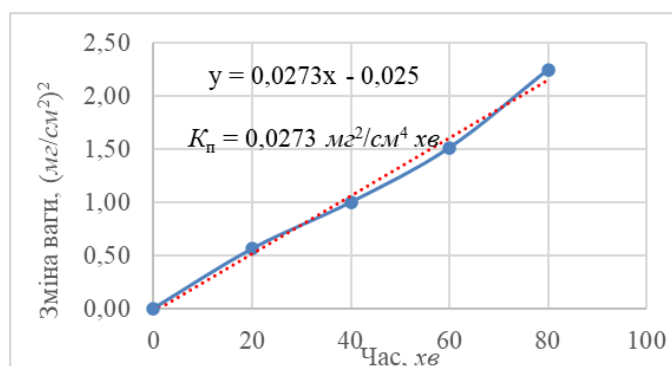


Рис. 1.4. Знаходження параболічної константи швидкості окислення сплаву графічним методом

У висновках зазначають, чи задовольняє оксид даного металу або оксиди компонентів сплаву умові суцільності, вказують закон росту оксидної плівки в часі на даному металі або сплаві на повітрі за заданої температури, наводять одержану емпіричну формулу $\Delta m/S=f(\tau)$ зі зазначенням одиниць змінних Δm і τ , що входять до неї, результати перевірки її достовірності, формулюють своє судження про фактор, що контролює швидкості окиснення металу або сплаву, співставляють значення дійсної та середньої швидкості процесу для визначеного моменту часу.

Контрольні запитання

- 1) Чи є ідентичними поняття “хімічна корозія” та “газова корозія”?
- 2) У яких випадках утворюється захисна оксидна плівка? Наведіть приклади.
- 3) Які ви знаєте основні види хімічної корозії?
- 4) Які існують механізми перебігу хімічної корозії?
- 5) Яка ознака покладена в основу класифікації оксидних плівок?

Лабораторна робота № 2. ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА ШВИДКІСТЬ ОКИСНЕННЯ МЕТАЛІВ НА ПОВІТРІ

Мета роботи

На підставі зміни маси зразків дослідити вплив температури на швидкість окислення металу на повітрі та встановити температурну залежність швидкості окислення.

Загальні теоретичні відомості

На швидкість корозії металу на повітрі впливають зовнішні фактори (склад і тиск газового середовища, швидкість його переміщення, температура, режим нагрівання) та внутрішні фактори (хімічний склад і структура металу або сплаву, напруження в металі, характер обробки поверхні тощо).

Температура істотно впливає на швидкість газової корозії металів. Із підвищенням температури процеси газової корозії металів проходять значно швидше, незважаючи на зменшення термодинамічної імовірності реакції окиснення.

Характер впливу температури на швидкість окислення металів визначають температурною залежністю константи швидкості хімічної реакції (за кінетичного контролю процесу окислення металів) або коефіцієнта дифузії (за дифузійного контролю процесу).

У випадках, ускладнених побічними явищами, залежність швидкості газової корозії від температури передається рівнянням [3], [4]

$$K_{\Pi} = A e^{-Q/RT}, \quad (2.1)$$

де K_{Π} – параболічна константа швидкості зміни маси, $мг^2/(см^4 \cdot год)$;

A – передекспоненційний множник, що залежить від природи металу або сплаву;

Q – ефективна енергія активації процесу, $кал/моль$;

R – газова стала, $R = 1,99 \text{ кал}/(моль \cdot ^\circ C)$;

T – абсолютна температура, K .

Логарифмуючи рівняння (2.1) і підставляючи значення газової сталої, одержуємо

$$\ln K_{\pi} = \ln A - Q/RT. \quad (2.2)$$

Графік у координатах $\ln K_{\pi} = (1/T)$ являє собою пряму або ламану лінію, кожний злам якої відповідає змінам, що відбуваються в металі або прилеглий до нього оксидній плівці. Залежність $\ln K_{\pi} = (1/T)$ зручна для графічного знаходження швидкості газової корозії металу за будь-якої температури. Вона може бути використана і для визначення дійсних A і Q рівняння (2.1) на основі дослідних даних [3], [4]:

$$\ln A = \ln K_{\pi} \text{ за } 1/T = 0; \quad (2.3)$$

$$Q = -1,99 \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.4)$$

де α – кут, що утворює пряма $\ln K_{\pi} = (1/T)$ з додатним напрямком осі $1/T$ (рис. 2.1).

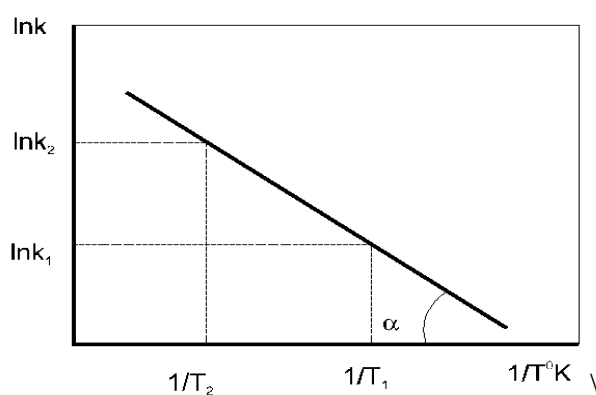


Рис. 2.1. Графік залежності параболічної константи швидкості окислення сплаву від температури

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи та обробки результатів експерименту

Устаткування, прилади, матеріали. Муфельна піч; 3 марковані зразки; 3 тиглі; штангенциркуль; наждачний папір; органічний розчин; фільтрувальний папір; електронні аналітичні ваги.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи. Для досліджень використовують по 3 марковані зразки з металу або сплаву. Кожний зразок досліджують за трьох-чотирьох значень температури.

Зразки вміщують у відкриті тиглі з вогнетривкого матеріалу, завантажують у нагріту до заданих температур піч і витримують у них визначений час (від 30 хв до 60 хв).

Підготовка зразків і порядок виймання їх із печі для охолодження та зважування описані в лабораторній роботі №1.

Результати дослідів заносять до таблиці 2.1. окремо для кожної температури.

Обробка результатів експерименту. Параболічну константу швидкості зміни маси K_p розраховують за формулою (1.1) для кожної температури. На основі дослідних даних будують графік $\ln K_p = (1/T)$, знаходять сталі коефіцієнти рівняння температурної залежності швидкості газової корозії металу або сплаву (2.1–2.4).

Таблиця 2.1. Результати експерименту

Експериментальні дані	Номер зразка			
	1	2	3	4
Розміри зразка, мм				
Площа поверхні зразка S , см^2				
Початкова маса зразка m_0 , г				
Час корозії τ , хв				
Маса зразка m_2 , г				
Питоме збільшення маси $\Delta m = (m_2 - m_0)/S$, мг/см^2				
Параболічна константа швидкості окислення K_p , $\text{мг}^2/(\text{см}^4 \cdot \text{год})$				

У висновках підсумовують про вплив температури на швидкість газової корозії металу або сплаву на повітрі, наводять отриману емпіричну формулу

температурної залежності швидкості газової корозії дослідженого металу або сплаву на повітрі та результати перевірки її достовірності.

Контрольні запитання

- 1) Поясніть, як впливають зовнішні фактори на хімічну корозію?
- 2) Поясніть, як впливають внутрішні фактори на хімічну корозію?
- 3) Які основні окисні компоненти повітряного середовища у газовій корозії?
- 4) Який складу оксидної плівки, що утворюється на сплавах на основі заліза під час нагрівання?
- 5) Що означає умова суцільності оксидної плівки?

Лабораторна робота № 3. ЖАРОСТІЙКІСТЬ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ НА ПОВІТРІ

Мета роботи

Дослідити вплив легуючих добавок на жаростійкість металу та його сплавів (заліза та хромистої або хромонікелевої сталі, міді та латуні, нікелю та ніхрому) на повітрі за заданої температури і часу витримки на підставі зміни маси зразків.

Загальні теоретичні відомості

Жаростійкістю називається здатність металу до опору корозійній дії газів за високих температур. В ряді випадків жаростійкість металів може бути зумовленою їх термодинамічною стійкістю, якщо в даному газовому середовищі за даної температури та парціальному тиску агресивного компонента ізобарно-ізотермічний потенціал під час реакції окиснення зростає або не змінюється, тобто, коли $\Delta G_r \geq 0$ [1]– [4].

За кінетичного контролю процесу газової корозії металу (у випадку утворення незахисних пористих плівок) жаростійкість визначається природою металу, а за дифузійного контролю процесу (у випадку утворення захисних суцільних оксидних плівок) – захисними властивостями оксидної плівки, що утворюється на металі, тобто здатністю гальмувати просування реагентів (кисню та металу) одне до одного, в багатьох випадках виникає завдяки їх дифузії через цю плівку.

Основними методами захисту металів від газової корозії є:

- 1) жаростійке легування, тобто введення в склад сплаву компонентів, які знижують швидкість окислення металу (хрому, алюмінію та кремнію для сплавів на залізній основі);
- 2) нанесення захисних металевих та неметалевих покриттів. З металевих покриттів найбільш розповсюджені: термодифузійні (термохромування, термоалітування, силіціювання тощо), отримані

занурюванням у розплавлений метал (наприклад, гаряче алітування сталі), напиленням жаростійкого металу (Al та ін.), а також плакуванням або наварюванням більш жаростійкого сплаву в найбільш відповідальних ділянках конструкції. З неметалевих покриттів застосовують керамічні емалі, покриття з тугоплавких сполук (карбідів, боридів, силіцидів) або для тимчасового захисту азбестосилікатні та інші мастила;

3) застосування захисних або контрольованих атмосфер, тобто штучно створених інертних відносно цього металу газових атмосфер, склад яких залежить від конкретних умов захисту. Для технологічних процесів обробки чорних металів основою цих атмосфер є суміші азоту, водню, вуглекислоти, оксиду вуглецю таких типів: як суміші N_2/CO_2 , CO/CO_2 або N_2/H_2O . Для дослідних цілей та за потреби підвищеного ступеня захисту поверхні металу від окислення застосовують інертні гази (Ar, He) або глибокий вакуум;

4) застосування інших методів, наприклад, згоряння палива з деякою нестачею кисню, додавання присадки до окисної атмосфери, домішок, здатних формувати більш захисні оксидні плівки, нагрівання металевих деталей в герметичних муфелях або захисних сольових розплавах, застосування індукційного нагрівання, скорочення часу нагрівання тощо.

Для нагрівання металу перед куванням та прокаткою від 450 °C до 1300 °C розроблені печі безокисного нагрівання. Правильніше ці печі потрібно називати печами малоокисного нагрівання, газова корозія металу все ж таки відбувається. Вони побудовані за принципом згоряння палива з нестачею повітря (коефіцієнт витрати повітря $\alpha=0,5$), тобто нагрівання відбувається у відновній атмосфері (CO , H_2 , CO_2 , H_2O).

В даній роботі розглянуто спосіб захисту металів від окиснення їх легуванням.

Легування металів та сплавів – це введення до їх складу компонентів, які поліпшують захисні властивості оксидної плівки, що утворюється внаслідок зменшення кількості дефектів у ґратках оксиду, по яких проходить дифузія реагентів, або утворення на поверхні сплаву захисного оксиду легуючого компоненту (Al_2O_3 на сталі та бронзі, BeO на берилієвій бронзі, ZnO

на латуні тощо), або утворення високозахисних подвійних (мішаних) оксидів легуючого компонента з основним металом типу шпінелі (FeCr_2O_4 на хромистих сталях, FeCr_2O_4 , NiFe_2O_4 та NiCr_2O_4 на хромонікелевих сталях, NiCr_2O_4 на ніхромі тощо).

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи та обробки результатів експерименту

Устаткування, прилади, матеріали. Муфельна піч; 3 марковані зразки; 3 тиглі; штангенциркуль; наждачний папір; органічний розчин; фільтрувальний папір; електронні аналітичні ваги.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи. Досліджують по 3 замаркованих зразка (вуглецевої сталі, нікелю, міді тощо) із різним вмістом легуючого елементу.

Попередньо підготовлені зразки (див. лабораторну роботу №1) поміщають у відкриті тиглі з вогнетривкого матеріалу, завантажують у нагріту до заданої температури піч і витримують в ній певний час (від 30 хв до 60 хв) за заданої температури. Після цього тиглі зі зразками виймають з печі, охолоджують та зважують.

Результати дослідів заносять в таблицю 3.1 окремо для кожного досліджуваного металу і сплаву.

Обробка результатів експерименту. Параболічну константу швидкості окислення K_p розраховують за формулою (2.2), і знаходять для кожного дослідного металу середнє значення цього показника корозії.

На основі одержаних дослідних даних будують графік $K_p = f(C_{Me})$ та оцінюють їх достовірність. У висновках відзначають, чи задовольняє оксид даного металу або оксиди компонентів сплаву умові суцільності, роблять висновок про термодинамічну стійкість і жаростійкість металу та вплив на них даного легуючого елементу.

Таблиця 3.1. Результати експерименту

Виміряні дані	Номер зразка			
	1	2	3	4
Розміри зразка, мм				
Площа поверхні зразка $S, \text{см}^2$				
Початкова маса зразка $m_0, \text{г}$				
Час корозії $\tau, \text{хв}$				
Маса зразка з тиглем, г				
Маса тигля, г				
Маса зразка з окалиною $m_2, \text{г}$				
Питоме збільшення маси $\Delta m = (m_2 - m_0) \cdot S, \text{мг/см}^2$				
Параболічна константа швидкості окислення $K_{\text{п}}, \text{мг}^2/(\text{см}^4/\text{хв})$				

Контрольні запитання

- 1) Які існують основні способи жаростійкого легування?
- 2) Які способи застосовують для захисту від газової корозії?
- 3) Які легуючі елементи підвищують жаростійкість сплавів на основі заліза?
- 4) У чому полягає суть методу безокислювального нагріву?
- 5) За якими законами відбувається ріст пористої та захисної плівки на металі?

Лабораторна робота № 4. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ХІМІЧНОЇ КОРОЗІЇ ОБ'ЄМНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи

Застосовуючи об'ємний метод дослідити швидкість корозії та визначити кислотність різних сплавів.

Загальні теоретичні відомості

Корозійні випробування металів і сплавів поділяються на польові, натурні і лабораторні.

У польових випробуваннях спеціально підготовлені зразки простої форми піддають корозійній дії в природних умовах експлуатації. Ці дослідження дають необхідні контрольні дані, але іноді вимагають дуже тривалих експозицій для більш точного визначення кількісних показників корозійної стійкості певного матеріалу.

Натурні випробування проводять у природних умовах експлуатації, але призначені вони для дослідження корозійної стійкості цілих агрегатів, машин та деталей. Такі випробування зазвичай є підсумковими або арбітражними та демонструють корозійну стійкість виробів із врахуванням виконання вимог із їх раціонального конструювання. Натурні випробування потребують тривалих експозицій, а одержані результати у ряді випадків складно порівняти для різних виробів з одного і того ж матеріалу.

Для проведення систематичних досліджень щодо вирішення окремих практичних завдань найбільш розповсюдженими є лабораторні корозійні випробування. Для цього використовують спеціально виготовлені зразки, для яких форма і способи вирізування виробів і напівфабрикатів визначаються вимогами відповідних ДСТУ. Зразки перед випробуванням піддають однотипній термічній і поверхневій обробці з таким розрахунком, щоб вони мали ідентичну структуру, однакову шорсткість і були ретельно знежирені.

Лабораторні дослідження проводять у штучно створених і ретельно контрольованих умовах, у деяких випадках застосовують багатоканальну вимірювальну апаратуру з безпосереднім записом вимірюваних показників.

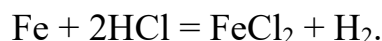
Лабораторні випробування дозволяють одержати достатньо відтворювані порівняльні дані і за їх допомогою визначити ступінь впливу окремих факторів (температури, вологості, напружень, вмісту агресивних компонентів, складу металу тощо) на розвиток корозійного процесу. Ідентичність цих результатів значно залежить від правильного вибору методу випробувань і способу оцінки корозії за різними її показниками.

Основні методи визначення корозійної стійкості металів і сплавів є:

- 1) зміна маси металу внаслідок корозії віднесена до одиниці поверхні та одиниці часу, $г/(см^2 \cdot год)$, $г/(см^2 \cdot рік)$;
- 2) річна глибина проникнення корозії, $мм$;
- 3) час появи першого корозійного осередку або площі, зайнятої корозією;
- 4) кількість виділеного в процесі корозії водню або поглинутого кисню (об'ємні методи);
- 5) кількість металу, що перейшов у розчин;
- 6) зміна механічних властивостей за певний час корозійного процесу, визначена у відсотках;
- 7) зміна електричного опору зразків;
- 8) зміна відбивальної здатності металу за певний час корозійного процесу, визначена у відсотках.

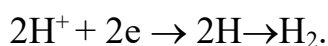
В даній лабораторній роботі вивчається один з об'ємних методів визначення швидкості корозії, який дозволяє не порушуючи і не перериваючи корозію, одержати повну кінетичну картину процесу. Сутність його полягає у тому, що фіксується об'єм газу (найчастіше водню, який виділяється під час корозії). Швидкість корозії оцінюють за кількістю газу, що виділяється за одиницю часу з одиниці поверхні зразка. Можна також визначити швидкість корозії і кількість металу, який прокородував, з одиниці поверхні за одиницю часу, $г/(см^2 \cdot год)$. При цьому кількість металу визначається за стехіометричним

записом реакції, що описує процес корозії. Наприклад, під час корозії заліза в соляній кислоті відбувається реакція:



Знаючи, що у нормальних умовах під час руйнування 1 *моля* металу виділяється 22,4 л водню, легко визначити кількість цього металу, який прокородував в умовах експерименту. Цю розрахункову величину бажано порівняти з дійсною зміною ваги зразка, зваживши його до і після корозійного випробування.

Корозія металів у неокисних кислотах (соляній, оцтовій, розведений сірчаній) проходить, як правило, з водневою деполяризацією, тобто основним процесом, що відбувається на катоді є відновлення іонів водню:



Щоб знизити швидкість корозії, потрібно вводити у розчин компоненти, які підвищують перенапругу водню, або легувати сплав елементами, що підвищують його кислотостійкість.

Корозійну стійкість сплавів в окисних кислотах, наприклад, азотній, можна підвищити, вводячи у метал елементи, що легко пасивуються (хром). Сталь, легована хромом, має підвищену стійкість в азотній кислоті.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи та обробки результатів експерименту

Устаткування, прилади, матеріали. Штангенциркуль; водневий корозиметр; наждачний папір; соляна кислота; електронні аналітичні ваги.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи. Зразки для досліджень ретельно зачищають, вимірюють і зважують із точністю до 0,1 мм та $\pm 0,0002$ г. Потім їх закріплюють на дроті, вкритому лаком, знежирюють і встановлюють під лійкою вимірною бюретки (рис. 4.1).

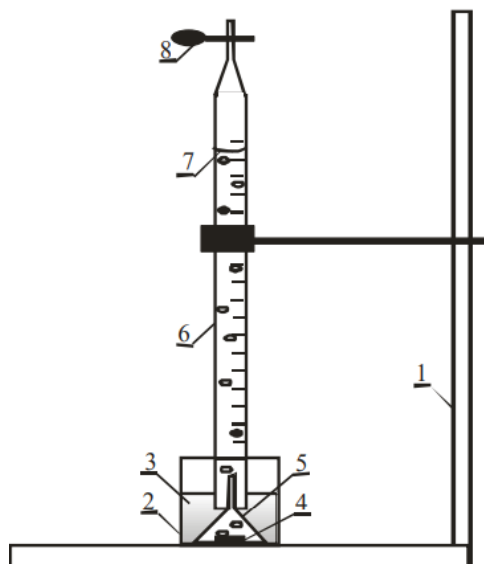


Рис. 4.1. Найпростіший водневий корозиметр: 1 –штатив; 2 – стакан; 3 – розчин сірчаної кислоти; 4 – металевий зразок; 5 – лійка; 6 – бюретка; 7 – меніск розчину сірчаної кислоти; 8 – затискач [8]

Кожний зразок занурюють у розчин кислоти заданої концентрації та температури і через лійку за допомогою ручного насосу кислоту набирають в бюретку до її верхньої поділки. Кількість водню, що виділяється, визначають через 5, 10, 15, 30, 45, 60 хв від початку досліду із точністю до $0,1 \text{ см}^3$ і заносять до таблиці 4.1. Через 60 хв зразки витягають, ретельно видаляють з них промивною дистильованою водою продукти корозії, протирають фільтрувальним папером, висушують на повітрі і зважують.

Обробка результатів експерименту. Для кожного дослідного зразка будують кінетичну характеристику процесу в координатах $V_{\text{H}_2} = f(\tau)$.

У висновках порівнюють кислотостійкість сплавів, розглядають вплив складу електроліту та умов корозії на швидкість процесу та інші питання, пов'язані з конкретним дослідом.

Таблиця 4.1. Результати експерименту і розрахунків щодо вивчення швидкості корозії об'ємним методом

№ п/п	Характеристика	Номер зразка		
		1	2	3
1	Зразків:			
	сплав	Fe	Fe–10Cr	Ni–10Cr
	висота, см			
	діаметр, см			
	площа S , см ²			
	початкова маса q_0 , г			
	кінцева маса q_t , г			
2	Електроліту:			
	розчин	HCl	HCl	HCl
	концентрація, %	10	10	10
	кількість водню V_{H_2} , см ³ , що виділяється після початку досліду через τ , хв			
	5			
	10			
	30			
	60			
3	Масовий показник корозії $K_m^- = (q_t - q_0)/S\tau$, г/(см ² · год)			
4	Об'ємний показник корозії $K_{об}$, розрахований за кількістю V_{H_2} , що виділився за весь час досліду, г/(см ² · год)			
5	Розходження між масовим і об'ємним показниками корозії $\frac{(K_{об} - K_m^-)}{K_{об}} \cdot 100$, %			

Контрольні запитання та завдання

- 1) Що таке об'ємний метод визначення швидкості корозії?
- 2) Які ви знаєте основні методи визначення корозії?
- 3) Як змінюється графік залежності $V_{H_2} = f(\tau)$?
- 4) Як розрахувати масу заліза, що прокородувало, за об'ємом виділеного під час дослідження водню?
- 5) Як оцінити кислотостійкості одного сплаву в різних кислотах?
- 6) Як визначити вплив концентрації кислоти на швидкість корозії сплаву?
- 7) Вивчити кислотостійкості різних сплавів в одному розчині кислоти (наприклад, нелегована сталь, хромиста сталь і хромонікелева сталь).

Лабораторна робота № 5. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ КОРОЗІЇ МАСОВИМ МЕТОДОМ

Мета роботи

Дослідити швидкості корозії металу або сплаву в розчинах кислот масовим методом.

Загальні теоретичні відомості

Визначення корозійної стійкості матеріалів за зміною маси зразка – простий і найнадійніший метод, бо безпосередньо показує кількість металу, зруйнованого корозією. Його використовують у тих випадках, коли корозія має більш-менш рівномірний характер, його звичайно застосовують під час спостереження за перебігом корозії, що відбувається на маловуглецевих сталях, цинку та міді. Корозійні дослідження проводять на спеціальних зразках, які закріплюють у вибраному середовищі так, щоб було зручно вести спостереження [8]. На швидкість електрохімічної корозії значний вплив має температура, тому що змінюється швидкість дифузії, ступінь пасивності, розчинність продуктів корозії тощо. Під час розчинення металів у неокисних кислотах спостерігається експоненціальна залежність швидкості корозії від температури (див. рівняння (2.1)). Але тут замість K_m^+ потрібно розраховувати від'ємний масовий показник корозії K_m^- , тому що маса зразка за умов корозії в кислоті зменшується [8]. Таким чином,

$$\begin{aligned} K_m^- &= Ae^{-Q/RT}, \\ K_m^- &= g_\tau - g_0 / S\tau, \end{aligned} \quad (5.1)$$

де g_τ , g_0 – кінцева і початкова маса зразка, відповідно, г;

S – площа поверхні зразка, см^2 ;

τ – тривалість процесу корозії, год.

Визначивши масовий показник корозії для досліджуваного сплаву у розчині кислоти за різних температур, можна за методикою, описаною в лабораторних роботах № 2 і 4, скласти емпіричне рівняння залежності швидкості електрохімічної корозії від температури.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи та обробки результатів експерименту

Устаткування, прилади, матеріали. Набір кислот (соляна, сірчана, оцтова); штангенциркуль; наждачний папір; лабораторні колби; електронні аналітичні ваги.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи. Досліджують зразки якого-небудь одного металу або сплаву у водному розчині кислоти (соляної, сірчаної або оцтової) за одним із часів витримки 15, 20, 45, 60 хв (рис. 5.1).

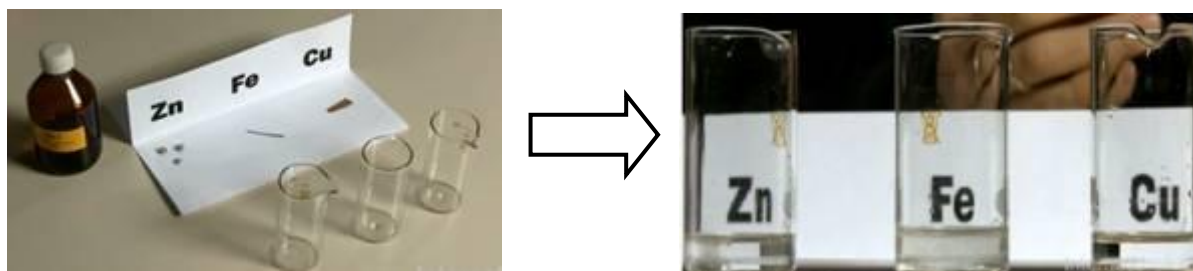


Рис. 5.1. Ілюстрація щодо проведення дослідів

Зразки зачищають, вимірюють, знежирюють і зважують з точністю до $\pm 0,1$ мм та $\pm 0,0002$ г. Потім кожний зразок вміщують до колби із кислотою, колбу закривають герметичним корком і витримують зразки у розчині упродовж часу зазначеного викладачем. Після цього всі зразки швидко виймають з розчину, промивають водою, висушують і зважують.

За вказівкою викладача замість визначення швидкості корозії можу бути досліджена залежність швидкості корозії зразків від концентрації кислоти (найчастіше використовують сірчану кислоту концентрації 10, 15, 20, 30, 40, 50 %).

Результати дослідів заносять у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1. Результати експерименту і розрахунку щодо вивчення швидкості електрохімічної корозії масовим методом

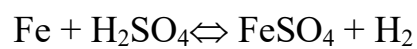
№ п/п	Характеристика	1	2	3	4
1	Зразки:				
	матеріал				
	висота, см				
	діаметр, см				
	площа поверхні S, см²				
	початкова маса g_0, г				
	кінцева маса, g_t, г				
	маса зразка, г після витримки протягом				
	5 хв				
	10 хв				
	20 хв				
	40 хв				
	60 хв				
	Тривалість випробувань, год				
2	Електроліт:				
	розчин				
	концентрація				
3	Масовий показник корозії				

Обробка результатів експерименту. Будують одну з графічних залежностей. У висновках описують залежність, яку отримали.

Контрольні запитання та завдання

- 1) Які переваги та недоліки масового методу корозії?
- 2) Як змінюється корозія сплавів на основі заліза (чавун, сталь, нержавіючі сталі) від збільшення концентрації соляної, сірчаної та азотної кислот?
- 3) Як впливає температура на швидкість корозії сплавів на основі заліза (чавун, сталь) у соляній, сірчаній та азотній кислотах?
- 4) Як впливає концентрація солей та лугів на корозію металів?

5) Яка кількість заліза прокородувала за температури 50 °C та тиску 753 мм рт. ст., якщо за реакцією



під час корозії виділилось 10 мл водню?

Лабораторна робота № 6. ЕЛЕКТРОЛІТИЧНЕ НІКЕЛЮВАННЯ МІДІ

Мета роботи

Дослідити вплив режиму отримання нікелевого покриття на вихід застумом та товщину шару.

Загальні теоретичні відомості

Існує безліч різних методів боротьби із корозією металів. Всі вони можуть бути розділені на такі основні групи [6]:

1) нанесення захисних покриттів, які можуть бути на органічній основі (лаки, фарби, мастила), на неорганічній основі (оксидні, хроматні тощо), металеві (гальванічні, гарячі, металізаційні тощо);

2) обробка корозійного середовища з метою зменшення його корозійної активності (наприклад, у корозійні рідини і гази вводять сповільнювачі корозії – інгібітори);

3) електрохімічний захист: найбільш розповсюджений катодний та протекторний захист, який застосовують для запобігання корозії великих металевих конструкцій, таких як підземні комунікації, корпуси суден тощо;

4) підвищення корозійної стійкості металів і сплавів за допомогою удосконалення технології та спеціального легування;

5) раціональне конструювання та експлуатація металевих споруд та деталей.

В даній лабораторній роботі розглядається нанесення та дослідження таких захисних покриттів, як гальванічні та оксидні.

Найбільш поширеним є гальванічний метод нанесення захисних металевих покриттів, який забезпечує одержання рівномірного за товщиною захисного шару, який щільно прилягає до поверхні виробу.

Залежно від співвідношення електродних потенціалів металу покриття і металу, з якого виготовлено виріб, вирізняють два типи покриттів – катодне та анодне, що мають різні захисні властивості.

Потенціал катодного покриття вище, ніж потенціал металу, що захищають, тому основний виріб не буде підлягати електрохімічній корозії лише до того часу, доки захисний шар залишається суцільним. Іншими словами, катодне покриття забезпечує чисто механічний захист, виключаючи контакт виробу з агресивним середовищем [7].

Потенціал анодного покриття нижче за потенціал металу, що захищають – в такому випадку виріб захищають не тільки механічно, але і електрохімічно, бо покриття є анодом і буде кородувати, запобігаючи руйнуванню виробу.

Електрохімічний метод нанесення металевого покриття полягає в електролізі розчину, який містить сіль металу, що осів. Анодом, як правило, є матеріал покриття, катодом – виріб. Під дією постійного електричного струму від зовнішнього джерела на катоді відбувається розряд позитивних іонів металу з розчину ($Me^{2+} + 2e \rightarrow Me^0$) та утворення металевого покриття. Анод, що розчиняється під час електролізу посилає в розчин іони металу, підтримуючи цим сталість їх концентрації.

Кількісно електроліз підпорядковується законам Фарадея, на основі яких можна підрахувати вихід за струмом, товщину шару покриття і час, необхідний для одержання шару заданої товщини.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи та обробки результатів експерименту

Устаткування, прилади, матеріали. Електроліт; мідна пластина; штангенциркуль; наждачний папір; реостат; мілівольтметр; склянна ванна; електронні аналітичні ваги.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи. Зразок у вигляді мідної пластини, призначений для нікелювання, ретельно вимірюють, зчищають, знежирюють, протрують у кислоті і зважують з точністю $\pm 0,0002$ г.

Підготовлену таким чином пластину закріплюють на катоді гальванічної ванни, анодом служить нікелева пластина. Електроліт – розчин нікелевої солі $\text{Ni}_2(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$.

Гальванічна ванна підключена до випрямляча за схемою, показаною на рис. 6.1.

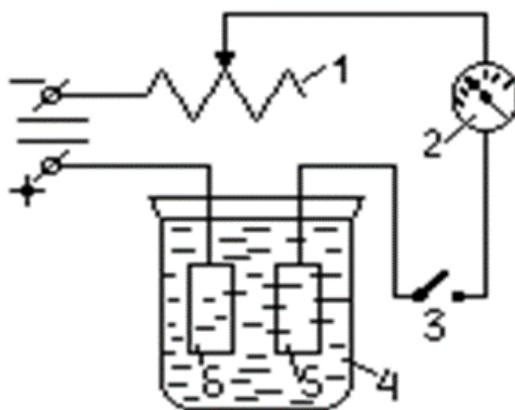


Рис. 6.1. Схема установки для одержання електролітичного покриття: 1 – змінний опір; 2 – міліамперметр; 3 – рубильник; 4 – скляна ванна; 5 – катод; 6 – анод

За густиною струму i_k , яку рекомендують підтримувати на рівні $0,007 \text{ A/cm}^2$, і за величиною площі поверхні мідної пластини S визначають силу струму електролізу:

$$I = i_k \cdot S \cdot (\alpha). \quad (6.1)$$

Коло замикають і, переміщенням повзуна реостата, встановлюють за міліамперметром вираховану силу струму. Електроліз проводять упродовж 60 хв, контролюючи та регулюючи силу струму. Потім пластину виймають, промивають водою, висушують і зважують. Результати вимірювань заносять до таблиці 6.1.

Обробка результатів експерименту. У звіті обов'язково вказують такі параметри проведених досліджень:

- 1) густина струму i_k , A/cm^2 ;
- 2) силу струму I , A ;

- 3) тривалість електролізу τ , год;
- 4) масу зразка до q_0 , г;
- 5) масу нікелю, що виділився, $\Delta = q_\tau - q_0$, г.

Таблиця 6.1. Результати експерименту

Варіант	Розмір зразка, см	Початкова маса зразка q_0 , г	Маса зразка після електролізу q_τ , г	Тривалість електролізу τ , год
1				
2				
3				
4				

Вихід за струмом розраховують за формулою, %:

$$\eta = (\Delta q / I \cdot \tau \cdot C) \cdot 100,$$

де C – електрохімічний еквівалент металу, що осаджують (для нікелю $C = 1,09$ г/(А·год)).

Товщину шару покриття обраховують за формулою, мкм:

$$y = (i_k \cdot \tau \cdot C \cdot \eta / d) \cdot 10000,$$

де d – густина металу, що утворює покриття (для нікелю $d = 8,9$ г/см³).

У висновках оцінюють вихід за струмом, товщину шару покриття, визначають тип покриття – анодне чи катодне та вказують його захисні властивості.

Контрольні запитання та завдання

- 1) У чому полягає різниця між катодним та анодним покриттям?
- 2) Які покриття є катодними для сплавів на основі заліза?

- 3) У чому полягають принципи раціонального конструювання для захисту металів від корозії?
- 4) Які існують засоби нанесення металевих покриттів?
- 5) Які існують методи захисту металів від корозії? Наведіть класифікацію методів.

Лабораторна робота № 7. АНОДНЕ ОКСИДУВАННЯ АЛЮМІНІЮ

Мета роботи

Дослідити вплив концентрації електроліту на товщину і пористість оксидного шару на поверхні алюмінію.

Загальні теоретичні відомості

Хімічно захисним називається покриття, що утворюється на металі в природних умовах під час його взаємодії з корозійним середовищем або створене штучним шляхом та ускладнює перебіг процесу корозії. Хороші захисні властивості мають тільки безпористі покриття.

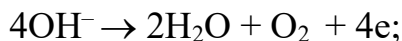
Покриття, що складається із оксидів, називається оксидним.

Отримання оксидних покриттів досягається двома способами: хімічним або електрохімічним [6], [7]. У першому випадку процес називається *хімічним оксидуванням* або *анодуванням*.

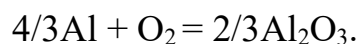
Оксидування являє собою процес травлення металу в сильних окислювальних середовищах з метою утворення на поверхні металу шару оксидів. Захист алюмінію та його сплавів анодним оксидуванням у розчині сірчаної кислоти застосовується, як усталений технологічний процес у багатьох галузях промисловості. Близько половини алюмінієвих деталей, що застосовують у машинобудуванні, зазнає анодне оксидування.

Під час оксидування в розчині сірчаної кислоти процеси, що проходять на аноді, можуть бути поділені на дві стадії:

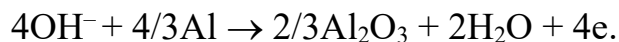
- 1) розрядка гідроксильних іонів з утворенням молекул кисню [6]



- 2) зростання оксидної плівки на поверхні алюмінію – анода за рахунок окислення киснем, що утворився



Сумарний анодний процес описується рівнянням [6], [7]



Анодним оксидуванням товщина оксидної плівки може бути доведена від 100 мкм до 300 мкм, у той час як у звичайних атмосферних умовах її товщина не перевищує від 0,005 мкм до 0,02 мкм. Оксидна плівка, що утворилась, як правило, має низькі захисні властивості через високу пористість. Тому звичайно після оксидування проводиться заповнення оксидної плівки – заповнення пор гідратованим оксидом алюмінію або іншими сполуками алюмінію, що мають більший об'єм, ніж його оксид алюмінію Al_2O_3 . Найчастіше заповнення проводять зануренням оксидованих виробів у нагріті розчини хроматів (наприклад, біхромату калію). Окрім чисто захисних функцій, заповненням покращують і зовнішній вигляд виробу, надаючи йому бажане забарвлення. За зміною маси оксидованого зразка під час заповнення можна також судити про пористість оксидної плівки [5]–[7].

Оксидована поверхня сталевих виробів має достатню корозійну стійкість тільки в атмосферних умовах за відсутності значної вологості. У багатьох випадках більш надійним захистом від корозії в атмосферних умовах є плівка, яка складається з фосфорнокислих солей марганцю та заліза. Процес отримання такої захисної плівки називається *фосфатуванням*.

Фосфатні плівки стійкі в мастилах і розчинниках, але руйнуються в кислотах і лугах. Найкращі результати досягаються у фосфатуванні вуглецевих сталей та незначні у фосфатуванні чавуну, алюмінію, магнію, цинку та кадмію. Плівка із фосфорнокислих солей марганцю та заліза має значну пористість, що сприяє хорошему зчепленню з лакофарбованими покриттями. Тому фосфатні покриття широко застосовують у машинобудуванні, у тому числі і в автомобілебудуванні.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи та обробки результатів експерименту

Устаткування, прилади, матеріали. Електроліт; алюмінієва пластина; штангенциркуль; наждачний папір; реостат; мілівольтметр; склянна ванна; електронні аналітичні ваги.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи.

1. Виготовлення оксидної плівки. Алюмінієву пластину вимірюють, знежирюють (в інтервалі від 10 с до 15 с занурюють до 10 % розчину їдкого натрію), промивають і протравлюють у 40–50 % розчині азотної кислоти, знову промивають, висушують і зважують з точністю $\pm 0,0002$ г.

Схема для установки оксидування така сама, як і для електролітичного нікелювання міді (рис. 6.1). В електролітичну ванну заливають сірчану кислоту заданої концентрації. Алюмінієва пластина є анодом.

Виходячи з густини струму для оксидування 2 A/cm^2 та величини площі поверхні, що оксидується, розраховують потрібну силу струму. Занурюють електроди у розчин, попередньо замкнувши коло, щоб уникнути розчинення алюмінію в кислоті. Реостатом встановлюють потрібний струм, який контролюють амперметром. Оксидування ведуть упродовж 40 хв, підтримуючи сталу силу струму. Далі зразок виймають, промивають та зважують.

Результати процесу оксидування оцінюють за різницею маси зразка до і після оксидування, віднесеної до одиниці площі поверхні.

2. Наповнення оксидної плівки. Оксидований зразок занурюють у нагрітий до 95 °С розчин біхромату калію $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, в якому витримують його упродовж 20 хв, після чого зразок промивають, висушують і зважують. Рівень наповнення оксидної плівки оцінюють за зміною маси зразка до і після наповнення, віднесеної до одиниці площі поверхні.

Дані експерименту та результати розрахунків заносять до таблиці 7.1.

Обробка результатів експерименту. За проведеними розрахунками будують графіки залежності показників оксидування та наповнення оксидної плівки від концентрації кислоти.

Таблиця 7.1. Результати експерименту оксидування в розчині сірчаної кислоти та наповнення оксидної плівки

№ п/п	Характеристика	Номер зразка			
		1	2	3	4
1	Електроліт:				
	розчин сірчаної кислоти				
	концентрація				
	температура, °C				
2	Зразки:				
	товщина, см				
	довжина, см				
	ширина, см				
	площа поверхні S , см^2				
	маса зразка до оксидування q_1 , г				
	маса зразка після оксидування q_τ , г				
	показник оксидування $(q_\tau - q_0)/S$, г/см ²				
3	Розчин біхромату калію $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$				
	температура, °C				
	маса зразка після наповнення q_n , г				
	показник наповнення $(q_n - q_\tau)/S$, г/см ²				

У висновках описують вплив концентрації розчину електроліту на формування оксидної плівки, її пористість і захисні властивості.

Контрольні запитання та завдання

- 1) Які існують хімічні захисні покриття? Наведіть класифікацію.
- 2) Які існують методи нанесення хімічних захисних покриттів?
- 3) В яких галузях застосовують оксидування та фосфатування виробів?
- 4) З яких сполук складається плівка, яка утворюється в процесі фосфатування?
- 5) З якою метою проводять наповнення у оксидуванні алюмінію?

Лабораторна робота № 8. СПОВІЛЬНЕННЯ КОРОЗІЇ СТАЛІ В КИСЛОТАХ МЕТОДОМ ОБРОБКИ АГРЕСИВНОГО СЕРЕДОВИЩА

Мета роботи

Дослідити ефективність дії сповільнювачів корозії (інгібіторів) на корозію сталі в кислоті.

Загальні теоретичні відомості

У промислових умовах широко застосовується захист металів від корозії спеціальною обробкою корозійного середовища, яка знижує швидкість корозії та створенням захисної атмосфери.

Часто швидкість корозії металу значно знижується в результаті введення до корозійного середовища невеликої кількості спеціальних добавок – інгібіторів корозії. Розрізняють інгібітори [7], [8]:

- 1) кислотної корозії – речовина, яка знижує швидкість корозії у кислому середовищі;
- 2) лужної корозії – речовина, яка знижує швидкість корозії у лужному середовищі;
- 3) корозії в нейтральних середовищах – речовина, яка знижує швидкість корозії у нейтральних середовищах;
- 4) атмосферної корозії – речовина, яка знижує швидкість корозії в атмосферних умовах;
- 5) леткі – речовини, здатні у звичайних умовах випаровуватись і самочинно потрапляти з газового середовища на поверхню металу;
- 6) універсальні – інгібітори, придатні для захисту чорних і кольорових металів;
- 7) анодні – речовини, захисна дія яких обумовлена гальмуванням анодної або катодної реакції корозійного процесу.

Захисна атмосфера, яка штучно створюється для захисту металу від газової корозії, часто складається з інертних або відновних газів.

Захист металів від корозії досягається також шляхом вилучення з корозійного середовища кисню повітря. Такий захист називається *деаерацією*.

Ефективність дії інгібітора визначається таким співвідношенням, % :

$$Z = \frac{K_m^- - K_{mi}^-}{K_m^-} \cdot 100,$$

де K_m^- , K_{mi}^- – масовий показник корозії в середовищі без інгібітора та в середовищі з інгібітором, відповідно.

Сповільнювачі звичайно застосовують у системах з обмеженим об'ємом розчину. Під час корозії в кислотах найбільш ефективним є застосування іонів водню на катоді ($H^+ + e \rightarrow H^0$). До них належать: солі вісмуту, желатину, агар-агар, уротропін та інші речовини.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи та обробки результатів експерименту

Устаткування, прилади, матеріали. Набір кислот (соляна, сірчана, оцтова); інгібітори; штангенциркуль; наждачний папір; лабораторні колби; електронні аналітичні ваги.

Порядок і рекомендації щодо виконання роботи. Дослідження виконують на зразку з однієї марки сталі в розчині кислоти без інгібітору та в розчинах кислоти із різними інгібіторами. Апаратура та методика проведення досліду повністю аналогічні описаним в лабораторних роботах №4 і №5.

Результати випробувань заносять у таблицю 8.1.

Обробка результатів експерименту. У висновках оцінюють вплив інгібіторів на швидкість корозії, порівнюють ефективність дії різних інгібіторів.

Таблиця 8.1. Вплив інгібіторів на швидкість корозії сталі

№ п/п	Електроліт	Інгібітор	Площа поверхні $S, \text{см}^2$	Маса зразка		Масовий показник корозії $K_m, \text{г/см}^2 \cdot \text{год}$	Ефективність дії інгібітора $Z, \%$
				початкова $g_0, \text{г}$	кінцева $g_t, \text{г}$		

Контрольні запитання та завдання

- 1) Які існують методів захисту від корозії обробкою агресивним середовищем? Наведіть класифікацію методів.
- 2) Що таке інгібітор?
- 3) Які види інгібіторів існують? Наведіть класифікацію інгібіторів.
- 4) У чому полягає механізм дії інгібіторів?
- 5) У чому полягає захист від газової корозії обробкою агресивного середовища?

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Evans U. R. The Corrosion and Oxidation of Metals : Scientific Principles and Practical Applications. London : Edward Arnold, 1960. 272 p.
2. Kofstad P. High temperature corrosion. London and New York : Elsevier Applied Science, 1988. 559 p.
3. Birks N., Meier G. H., Pettit F. S. Introduction to the High Temperature Oxidation of Metals. Cambridge University Press, 2006. 338 p.
4. Yound D. J. High temperature oxidation and corrosion of metals. 2nd edition. Elsevier, 2016. 758 p.
5. Хімічна корозія та захист металів : навч. посіб. / П. І. Стоєв, С. В. Литовченко, І. О. Гірка, В. Т. Грицина. Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2019. 216 с.
6. Бик М. В., Букет О. І., Васильєв Г. С. Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 318 с.
7. Готвянський Ю. Я. Фізико-хімічні та металургійні основи виробництва металів : навч. посіб. Київ : ІЗМН, 1996. 392 с.
8. Поляков О. Є., Авдєєнко А. П., Холмовой Ю. П. Корозія та захист металів : лабораторний практикум. Краматорськ : ДДМА, 2008. 160 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1. Стандартні потенціали металевих електродів

Електрод	Електродна реакція	E^0, V
1	2	3
Li^+/Li	$Li^+ + e = Li$	-3,045
Rb^+/Rb	$Rb^+ + e = Rb$	-2,925
K^+/K	$K^+ + e = K$	-2,925
Cs^+/Cs	$Cs^+ + e = Cs$	-2,923
Ba^{2+}/Ba	$Ba^{2+} + 2e = Ba$	-2,906
Ca^{2+}/Ca	$Ca^{2+} + 2e = Ca$	-2,866
Na^+/Na	$Na^+ + e = Na$	-2,714
Mg^{2+}/Mg	$Mg^{2+} + 2e = Mg$	-2,363
Be^{2+}/Be	$Be^{2+} + 2e = Be$	-1,847
Al^{3+}/Al	$Al^{3+} + 3e = Al$	-1,662
Ti^{2+}/Ti	$Ti^{2+} + 2e = Ti$	-1,628
V^{2+}/V	$V^{2+} + 2e = V$	-1,186
Mn^{2+}/Mn	$Mn^{2+} + 2e = Mn$	-1,180
Cr^{2+}/Cr	$Cr^{2+} + 2e = Cr$	-0,913
Zn^{2+}/Zn	$Zn^{2+} + 2e = Zn$	-0,763
Cr^{3+}/Cr	$Cr^{3+} + 3e = Cr$	-0,744
Fe^{2+}/Fe	$Fe^{2+} + 2e = Fe$	-0,440
Cd^{2+}/Cd	$Cd^{2+} + 2e = Cd$	-0,403
Co^{2+}/Co	$Co^{2+} + 2e = Co$	-0,277
Ni^{2+}/Ni	$Ni^{2+} + 2e = Ni$	-0,250
Sn^{2+}/Sn	$Sn^{2+} + 2e = Sn$	-0,136
Pb^{2+}/Pb	$Pb^{2+} + 2e = Pb$	-0,126
Fe^{3+}/Fe	$Fe^{3+} + 3e = Fe$	-0,036
H^+/H_2	$H^+ + e = \frac{1}{2}H_2$	+0,000
Cu^+/Cu	$Cu^+ + e = Cu$	+0,521
Cu^{2+}/Cu	$Cu^{2+} + 2e = Cu$	+0,337
Ag^+/Ag	$Ag^+ + e = Ag$	+0,799
Hg^{2+}/Hg	$Hg^{2+} + 2e = Hg$	+0,854
Pd^{2+}/Pd	$Pd^{2+} + 2e = Pd$	+0,987

Продовження таблиці А.1.

1	2	3
Pt^{2+}/Pt	$\text{Pt}^{2+} + 2\text{e} = \text{Pt}$	+1,190
Au^{3+}/Au	$\text{Au}^{3+} + 3\text{e} = \text{Au}$	+1,498
Au^{+}/Au	$\text{Au}^{+} + \text{e} = \text{Au}$	+1,691