



Copyright (c) 2025 Oleksii Humeniuk, Inna Trus

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Олексій Гуменюк, Інна Трус

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ



Oleksii Humeniuk, Inna Trus

ANALYSIS OF MODERN CORROSION RATE MEASUREMENT METHODS

АНОТАЦІЯ

В сучасному світі, зі стрімким розвитком інфраструктури, захист від корозії набув особливої важливості. Сучасний світ залежить від складних інженерних конструкцій, таких як мости, будівлі, транспортні засоби, трубопроводи та електростанції, які переважно виготовляються з металів. Ці конструкції піддаються впливу агресивних факторів навколишнього середовища, що може призвести до їх руйнування і значних економічних втрат, а також до потенційної екологічної шкоди. Визначення швидкості корозії є ключовим завданням для впровадження ефективних стратегій захисту та подовження терміну служби металевих конструкцій.

Мета: Дослідити сучасні методи визначення швидкості корозії металевих матеріалів та проаналізувати наукові публікації, присвячені практичному використанню цих методів для моніторингу та контролю стану конструкцій. Зокрема, у роботі звернуто увагу на підходи, які дозволяють оперативно отримувати точні дані про інтенсивність корозійних процесів, що є необхідним для підвищення надійності та безпеки інфраструктурних об'єктів.

Методологія: Розглянуто як натурні, так і прискорені методи визначення швидкості корозії. Серед натурних досліджено масометричні методи. Прискорені методи включають масометрію за прискорених умов та електрохімічні підходи. Особливу увагу приділено методу поляризаційного опору, що дає змогу оперативно оцінювати корозійну активність середовища. Окрім цього, розглянуто циклічну вольтамперометрію, імпедансну спектроскопію та хронопотенціометрію як додаткові поляризаційні методи. Використання цих методів сприяє розробці більш ефективних стратегій захисту металів від корозійного впливу.

Наукова новизна: Систематизовано сучасні методи визначення швидкості корозії, враховуючи їх точність, швидкість отримання даних та придатність до реальних умов експлуатації. Виокремлено переваги методу поляризаційного опору як ключового засобу швидкого та надійного моніторингу корозійних процесів. Аналіз літератури дозволив узагальнити досвід застосування різних підходів у промисловості та наукових дослідженнях, визначити їхні переваги та недоліки, а також сформулювати рекомендації щодо подальшого вдосконалення методик.

Висновки: Натурні методи, такі як масометрія, максимально наближені до реальних умов корозії, проте вимагають тривалого часу експозиції, що може бути недоцільним при оперативних дослідженнях. Прискорені методи дають змогу швидко отримати результати, але іноді можуть частково відхилятися від реальної картини корозійних процесів. Електрохімія, зокрема метод поляризаційного опору та інші поляризаційні підходи, забезпечує точне і глибоке розуміння механізмів корозії, дозволяючи виявляти та аналізувати зміни, пов'язані з матеріалом та середовищем. Подальше поєднання натурних та прискорених методів, а також розвиток електрохімічних технік, сприятиме підвищенню ефективності контролю стану конструкцій та поліпшенню стратегій їхнього захисту в реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: корозія, електрохімія, визначення швидкості корозії, масометрія, поляризаційний опір, циклічна вольтамперометрія, імпедансна спектроскопія, хронопотенціометрія, моніторинг корозії

ABSTRACT

In the modern world, with the rapid development of infrastructure, corrosion protection has become particularly important. The contemporary world relies on complex engineering structures such as bridges, buildings, vehicles, pipelines, and power plants, which are predominantly made of metals. These structures are exposed to aggressive environmental factors that may lead to their destruction, significant economic losses, and potential environmental damage. Determining the corrosion rate is a key task in implementing effective protection strategies and extending the service life of metallic structures.

Purpose: To investigate modern methods for determining the corrosion rate of metallic materials and to analyze scientific publications dedicated to the practical application of these methods in monitoring and controlling the condition of structures. In particular, attention is focused on approaches that enable the prompt acquisition of accurate data on the intensity of corrosion processes, which is essential for improving the reliability and safety of infrastructure facilities.

Methodology: Field and accelerated methods for determining corrosion rates were examined. Field methods included gravimetric techniques, while accelerated methods comprised gravimetry under accelerated conditions and electrochemical approaches. Particular attention was paid to the polarization resistance method, which allows for the rapid assessment of the corrosive activity of the environment. In addition, cyclic voltammetry, impedance spectroscopy, and chronopotentiometry were examined as complementary polarization methods. The use of these methods promotes the development of more effective strategies to protect metals from corrosive effects.

Scientific Novelty: Modern methods of determining the corrosion rate were systematized, taking into account their accuracy, speed of data acquisition, and suitability for real operating conditions. The advantages of the polarization resistance method were highlighted as a key means for rapid and reliable monitoring of corrosion processes. Literature analysis made it possible to summarize the experience of applying different approaches in industry and research, to identify their advantages and disadvantages, and to formulate recommendations for further improvement of the techniques.

Conclusions: Field methods, such as gravimetry, closely reflect real corrosion conditions but require prolonged exposure times, which may be impractical for rapid investigations. Accelerated methods allow for quick results, but may sometimes partially deviate from the actual picture of corrosion processes. Electrochemistry, particularly the polarization resistance method and other polarization approaches, provides an accurate and in-depth understanding of corrosion mechanisms, allowing the detection and analysis of changes related to both the material and the environment. Further combination of field and accelerated methods, as well as the development of electrochemical techniques, will enhance the effectiveness of structural condition control and improve protection strategies under real operating conditions.

Key words: corrosion, electrochemistry, corrosion rate determination, mass measurement (gravimetry), polarization resistance, cyclic voltammetry, impedance spectroscopy, chronopotentiometry, corrosion monitoring

Постановка проблеми

Корозією називають поступовий процес руйнування металу під впливом навколишнього середовища, що відбувається через фізико-хімічні взаємодії між матеріалом і речовинами навколишнього середовища. У результаті цієї взаємодії матеріал втрачає свої робочі властивості. Корозія спричиняє проблеми в різних сферах, оскільки призводить до поломок обладнання та конструкцій, і потребує витрат на ремонт або заміну (Stoev et al., 2019). За деякими оцінками, прямі та непрямі витрати, пов'язані з корозією, складають до 5-10 % від національного доходу багатьох країн. В основному, це витрати на ремонт та заміну обладнання, простої виробництва та додаткові витрати на енергію (Stoev et al., 2019). Корозія впливає на довговічність будівельних конструкцій, транспортних засобів, морських суден та інших об'єктів інфраструктури. Це вимагає постійного моніторингу швидкості корозії, стану конструкцій та проведення спеціальних заходів (Stoev et al., 2019). Корозія може призвести до витoku шкідливих речовин у навколишнє середовище, що в свою чергу може спричинити до забруднення води та ґрунту. Це створює додаткові екологічні ризики та вимагає витрат на ліквідацію

наслідків. Корозія труб водопостачання в сфері житлово-комунального господарства є дуже серйозною проблемою. Вона може призвести до руйнування матеріалу трубопроводів, що може спричинити не тільки втрати води та додаткові витрати на ремонт, але й може залишити мешканців без води на певний час. Крім того, корозія може погіршити якість води, оскільки частинки металу та продукти корозії потрапляють у воду, що може бути шкідливим для здоров'я людей. Вимірювання швидкості корозії є дуже важливим, оскільки дозволяє зрозуміти, наскільки швидко труби зношуються. Знаючи це, можна завчасно планувати ремонт або заміну труб, щоб запобігти аваріям. Це допомагає забезпечити безперебійне постачання якісної води до будинків.

Метою роботи є огляд та критичний аналіз сучасних досліджень, що стосуються методів вимірювання швидкості корозії, визначення їх переваг, недоліків та сфери застосування.

Результати та їх обговорення

Загальна класифікація методів вимірювання швидкості корозії

Існують різні методи вимірювання швидкості корозії, які можна поділити на натурні та прискорені (рис. 1).

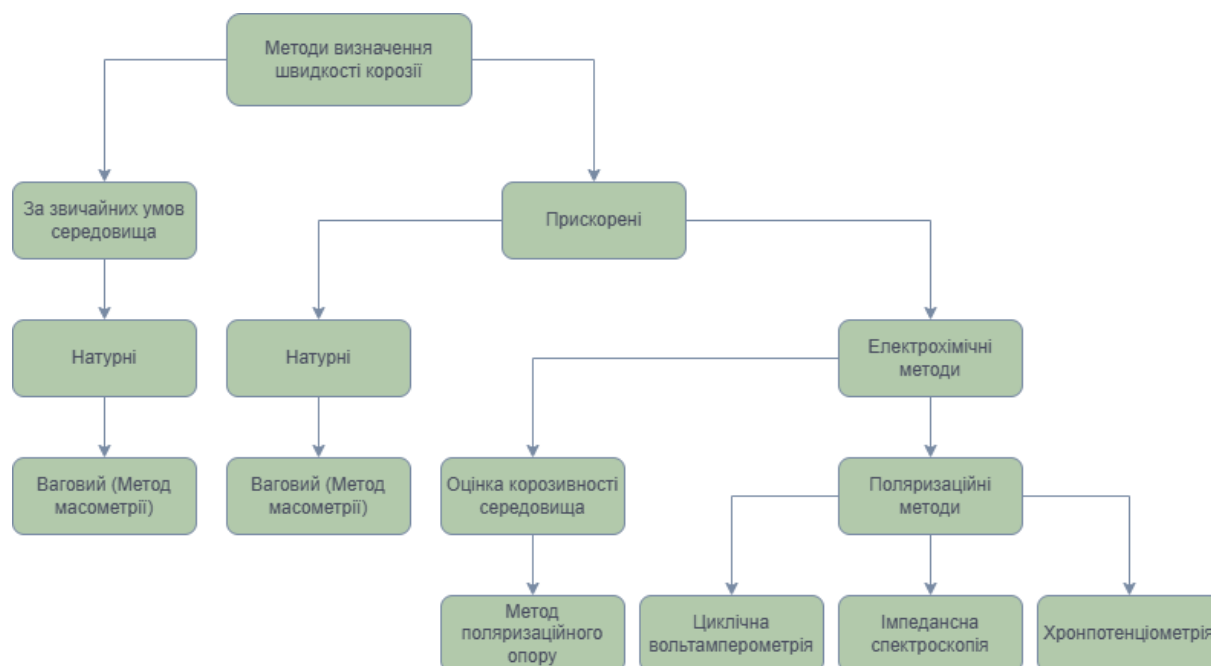


Рис. 1. Схематичне зображення методів вимірювання швидкості корозії

Кожен з них має свої особливості, переваги та недоліки. Найбільш простим є метод масометрії, який може відноситись як до натурних, так і до прискорених методів, в залежності від умов вимірювання. Суть масометричних методів вимірювання швидкості корозії полягає в вимірюванні зміни маси зразка металу після певного часу експозиції в корозійному середовищі.

Натурними методами визначення швидкості корозії називають ті, які передбачають вимірювання швидкості корозії в реальних умовах експлуатації матеріалу. Зразки піддаються експозиції при впливі тих самих факторів корозійного середовища, що і досліджувані об'єкти. До натурних методів визначення швидкості корозії відносяться масометричні (вагові) методи, проведені за звичайних умов. Процедура починається з очищення зразку металу, висушування його і зважування з високою точністю. Наступним етапом є поміщення зразку в корозійне середовище на визначений час. Після закінчення часу експозиції – зразок вилучається з корозійного середовища і з нього видаляються продукти корозії. І останній етап – зважування зразку для визначення втрати маси.

Автори статті (El Ibrahimy & Berdimurodov, 2023) описують метод аналізу втрати маси (масометрія) як найпростіший і широко застосовуваний метод вимірювання корозії в промислових умовах. Для отримання надійних результатів цей метод

вимагає врахування багатьох чинників, фізичні параметри середовища та тривалість експозиції. У статті детально розглядаються основні етапи використання методу масометрії: підготовка зразків, їхнє очищення, занурення в тестове середовище, видалення корозійних продуктів та оцінка результатів (El Ibrahimy & Berdimurodov, 2023).

Масометричний метод не потребує складного або дорогого обладнання, що робить його доступним для широкого застосування. Повторюваність експериментів із різними концентраціями екстракту кавових відходів показала стабільне зменшення швидкості корозії зі збільшенням концентрації інгібітора, що свідчить про надійність методу. Але для отримання значущих результатів необхідно проводити експозицію зразків протягом тривалого часу (1, 3, 5 і 24 години), що може бути непрактичним при потребі швидкого отримання даних (Sherifa Elhady et al., 2024).

До переваг цього методу вимірювання швидкості можна віднести його високу достовірність, так як результати відображають реальний вплив на матеріал в експлуатаційних умовах. Також при використанні даного методу можливо урахувати всі фактори, що можуть впливати на корозію. До недоліків цього методу відноситься потреба в довготривалій експозиції, високі витрати на моніторинг та дослідження зразків (рис. 2).

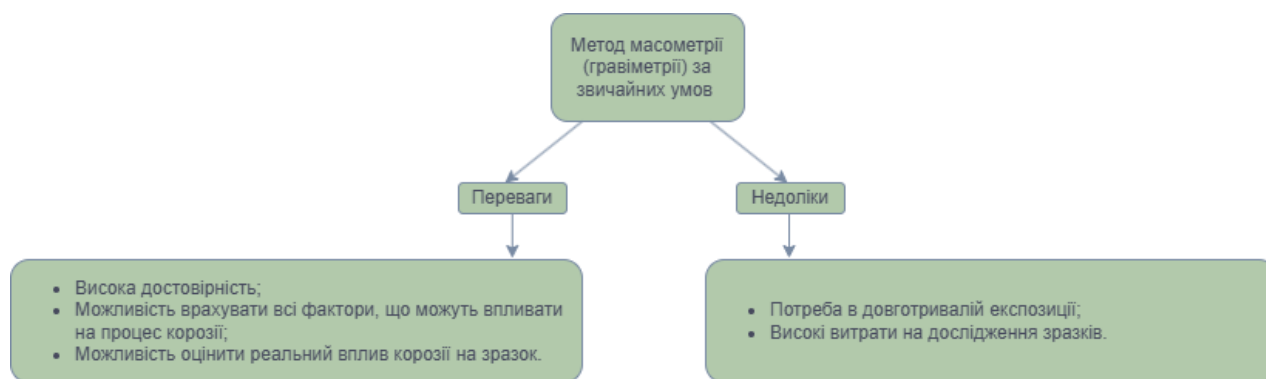


Рис. 2. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу масометрії (гравиметрії) за звичайних умов

Прискореними методами визначення швидкості корозії називають методи, які дозволяють швидко отримати достовірні дані про швидкість корозійних процесів. Ці методи поділяють на два основних типи: масометричні за прискорених умов і електрохімічні.

Метод масометрії за прискорених умов полягає у створенні спеціальних умов, що значно підвищують швидкість корозійного процесу, що дозволяє скоротити час експерименту та прискорити отримання результатів. Такі умови можуть включати підвищення температури, збільшення концентрації агресивних середовищ (кислот, солей) або посилення механічного впливу (наприклад, перемішування розчину). Метою прискорених умов є отримання даних про корозійну стійкість матеріалів у стислий термін, що особливо важливо для попереднього відбору матеріалів або інгібіторів. Етапи застосування даного методу відрізняються від етапів застосування методу масометрії за звичайних умов тільки тим, що після підготовки зразків створюються прискорені умови – використовується підвищена температура, збільшується концентрація розчину, змінюється рН середовища, аерація, механічний вплив (перемішування).

У статті (Loto et al., 2021) розглянуто оцінку корозійної стійкості латуні С26000 в різних концентраціях нітратної кислоти (HNO₃) (від 0,5 М до 3,5 М) за допомогою масометричного аналізу. Встановлено, що швидкість корозії латуні зростає зі збільшенням концентрації HNO₃ та часу експозиції. Теплова обробка (відпал та загартування) не мала істотного впливу на корозійну стійкість латуні в порівнянні з необробленими зразками (Loto et al., 2021).

У роботі (Ofoegbu, 2021) масометричний метод використовується для визначення швидкості корозії вуглецевої сталі. Зокрема, вимірювання втрати маси проводилось після занурення зразків у фруктові соки та розчини HCl різної концентрації, що дозволило обчислити швидкість корозії в кожному середовищі.

У статті (Khaldoune et al., 2023) досліджується вплив концентрації кислот і температури розчину на корозію вуглецевої сталі XC48 в умовах кислотного та соляного середовища. Оскільки сталь широко використовується у різних галузях, особливо у будівництві та промисловості, дослідження спрямоване на глибше розуміння поведінки сталі в агресивних середовищах для зменшення ризиків корозії. Масометрія застосовувалася для визначення швидкості корозії сталі, вимірюючи втрату маси зразків після експозиції в корозійному середовищі. Цей метод надав можливість оцінити загальну швидкість корозії на основі втрати маси за різних умов експерименту (Khaldoune et al., 2023).

У роботі (Sayyid et al., 2023) розглядалися механізми корозії металів і сплавів у кислотних середовищах, особливо в соляній кислоті (HCl), яка часто використовується в промислових процесах для видалення продуктів корозії. Це агресивне середовище прискорює корозію металів, таких як вуглецева сталь, що призводить до значного пошкодження обладнання, особливо в нафтовій промисловості, очищенні котлів та інших сферах. В умовах кислотного середовища метали швидше піддаються корозії, оскільки HCl сприяє інтенсивному розчиненню металу. Гравіметричні вимірювання в цій статті проводились шляхом занурення зразків низь-

ковуглецевої сталі у розчин 1 М НСІ з інгібіторами та без них. Після заданих періодів експозиції (1, 5, 10, 24, 48 годин) зразки вилучали, очищували за стандартом ASTM G1-03 та зважували для визначення втрати маси. Цей метод дозволив визначити швидкість корозії та оцінити ефективність інгібіторів FRP і PRP, порівнюючи масові втрати в агресивному середовищі з і без інгібіторів (Sayyid et al., 2023).

У статті (Zinad et al., 2020) досліджувалась ефективність нового, екологічно безпечного похідного кумарину, 4-((4-((4-гідрокси-3-метоксибензиліден)аміно)-5-тіоксо-4,5-дигідро-1Н-1,2,4-триазол-3-іл)-метил) (НАТС), як інгібітора корозії для низьковуглецевої сталі в кислому середовищі 1,0 М НСІ. Щоб оцінити вплив інгібітора, проводили гравіметричні дослідження та хімічні розрахунки. Використання кислого середовища прискорювало процес корозії сталі, дозволяючи точніше оцінити захисну дію інгібітора. Додавання НАТС знижувало швидкість корозії шляхом адсорбції на поверхні сталі. Гравіметричні вимірювання проводилися шляхом визначення втрати маси сталевих зразків після занурення в розчин НСІ із різними концентраціями інгібітора НАТС. Швидкість корозії та ефективність інгібітора розраховували, використовуючи втрату маси, площу поверхні зразків, густину та час експозиції. Отримані результати показали, що з підвищенням концентрації НАТС інгібування зростало, тоді як підвищення температури зменшувало його ефективність (Zinad et al., 2020).

У роботі (Loto et al., 2019) досліджували корозію міді в розчині сірчаної кислоти (2 М H_2SO_4) та досліджували ефективність амонію дихромату як інгібітора корозії. Щоб пришвидшити процес корозії, використовували агресивне середовище H_2SO_4 , яке прискорює розчинення металу, дозволяючи точніше оцінити ефективність інгібітора в короткі терміни. Гравіметричний метод застосовувався для вимірювання втрат маси зразків міді, занурених у розчин H_2SO_4 з різними концентраціями інгібітора та без нього. Зразки витягували, очищували і зважували через кожні два дні протягом 20 днів. За втратами маси обчислювали швидкість корозії та ефективність інгібітора за допомогою стандартних формул. Оцінка методом гравіметрії показала, що з

підвищенням концентрації інгібітора масові втрати зменшувалися. Ефективність інгібітора була високою, особливо при високих концентраціях амонію дихромату, де швидкість корозії досягала майже нульового значення (Loto et al., 2019).

У роботі (Kesari & Udayabhanu, 2023) був досліджений вплив вітаміну В12 як інгібітора корозії для низьковуглецевої сталі в кислому середовищі (15 % НСІ). Щоб пришвидшити корозію, використовували агресивний розчин НСІ, який прискорює електрохімічні процеси, що призводять до руйнування металу. Це дозволяло ефективніше оцінити захисні властивості інгібітора за відносно короткий час. Гравіметричний метод застосовували для визначення втрати маси зразків сталі після занурення в розчин 15 % НСІ з різними концентраціями вітаміну В12. Зразки занурювали в розчин при різних температурах (від 303 до 333 К) на 6 годин, після чого їх очищували, сушили та зважували. Зміна маси зразків дозволила розрахувати швидкість корозії та ефективність інгібітора. З результатів було виявлено, що з підвищенням концентрації вітаміну В12 ефективність інгібітора зростала, досягаючи 91.73 % при концентрації 100 ppm. Оцінка гравіметричних даних підтвердила, що швидкість корозії знижувалася зі збільшенням концентрації інгібітора. Водночас, при підвищенні температури ефективність інгібітора зменшувалася через зростання дифузії іонів H^+ та десорбцію водню з поверхні металу (Kesari & Udayabhanu, 2023).

У роботі (Aslam et al., 2020) досліджували ефективність похідного ізоксазолу як інгібітора корозії для низьковуглецевої сталі в кислому середовищі (1 М НСІ). Щоб прискорити корозію, використовували агресивний розчин НСІ, який стимулює електрохімічні реакції, що викликають деградацію металу, тим самим даючи можливість точніше оцінити ефективність інгібітора за короткий час. Гравіметричний метод застосовувався для визначення втрати маси зразків низьковуглецевої сталі після їх занурення в розчин 1 М НСІ з різними концентраціями ізоксазолу. Зразки занурювали на 6 годин при температурі 30 °С, а також перевіряли вплив температур (до 60 °С) на ефективність інгібітора. З підвищенням концентрації ізоксазолу до 300 ppm інгібітор забезпечував максимальну ефективність (96,6 %),

але при збільшенні температури ефективність знижувалась через десорбцію молекул інгібітора з поверхні сталі. Оцінка результатів показала, що інгібітор ефективно знижує швидкість корозії завдяки утворенню захисної плівки на поверхні металу (Aslam et al., 2020).

У статті (Ugi, 2020) досліджували вплив алкалоїду віндоліну як інгібітора корозії для сірого чавуну в середовищі 1 М HCl. Використання кислого середовища HCl пришвидшувало корозію, що дозволяло швидше оцінити ефективність інгібітора. Віндолін було отримано з рослини *Catharanthus roseus*, екстракція та очищення алкалоїду відбувалися за допомогою серії хімічних обробок і фільтрацій. Гравіметричний метод використовували для вимірювання втрати маси чавунних зразків після занурення у розчин HCl з різними концентраціями інгібітора. Зразки витягували, очищували, сушили та зважували після кожного циклу експозиції (3 години та 15 годин), і цей процес повторювали в трикратному повторенні. Гравіметричні дані показали, що корозія значно знижувалася зі збільшенням концентрації віндоліну, досягаючи ефективності інгібування до 99.0 %. Отримані результати підтвердили, що віндолін ефективно знижує швидкість корозії сірого чавуну, діючи як змішаний інгібітор (Ugi, 2020).

До переваг використання прискорених умов для визначення швидкості корозії можна віднести можливість швидкого отримання результатів і, як наслідок, економію ресурсів. Це дозволяє знизити тривалість експериментів і провести первинний відбір матеріалів або інгібіторів корозії на етапі розробки, виявляючи менш стійкі матеріали за короткий час. Такі методи також можуть стимулювати різні механізми корозії, що допомагає оцінити слабкі місця матеріалу при умовах експлуатації та обрати найбільш стійкі покриття або матеріали. Проте використання прискорених умов має і певні недоліки. Результати, отримані в умовах, що суттєво відрізняються від реальних, можуть бути некоректними, адже такі умови не завжди точно відображають поведінку матеріалу в експлуатації. Деякі фактори, як підвищена температура чи концентрація агресивного середовища, можуть призвести до специфічних форм корозії, що не характерні для звичайних умов (рис. 3). Через це для повної оцінки корозійної стійкості часто потрібно поєднувати прискорені методи з іншими, наприклад, електрохімічними методами, щоб підтвердити отримані дані та забезпечити їхню коректність для умов реальної експлуатації.



Рис. 3. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу масометрії (гравіметрії) за прискорених умов

Електрохімічні методи належать до прискорених методів оцінки швидкості корозії, оскільки вони дають змогу швидко отримати результати й дослідити механізми корозійних процесів. Класифікація цих методів базується на принципах вимірювання та характері отриманих даних. По оцінці корозивності середовища виділяють **метод поляризаційного опору**. За допомогою даного методу можливе вимірювання швидкості корозії в реальному часі. Суть методу полягає у визначенні поляризаційного опору, який є показником, обернено пропорційним струму корозії. Поляризаційним опором називають величину, що характеризує опір металу корозійним процесам і визначається як нахил поляризаційної кривої в точці корозійного потенціалу (Bik et al., 2018; Roberge, 2008).

У статті (Uthaman et al., 2019) досліджувалась корозійна стійкість сталевих арматур в бетоні, модифікованому леткою золою та наночастинками CaCO_3 і TiO_2 . Метою було оцінити вплив цих добавок на захист арматури від корозії. Були виготовлені зразки бетону з різними комбінаціями леткої золи та наночастинок: бетон з 40 % леткої золи (FA), бетон з 2 % CaCO_3 наночастинок (FAC), бетон з 2 % TiO_2 наночастинок (FAT) та бетон з 1 % CaCO_3 і 1 % TiO_2 наночастинок (FATC). Поляризаційний опір вимірювався електрохімічними методами, включаючи вимірювання потенціалу корозії (OCP) та лінійного поляризаційного опору (LPR). LPR-метод дозволяє отримати значення поляризаційного опору, що відображає стійкість до корозії арматури. Результати показали, що бетон з наночастинками CaCO_3 (FAC) продемонстрував високий поляризаційний опір та низьку швидкість корозії в порівнянні з немодифікованим бетоном. Метод поляризаційного опору (LPR) виявився ефективним для оцінки корозійної стійкості арматури в модифікованому бетоні, оскільки він забезпечив надійні дані про зміну корозійної швидкості та дозволив проводити моніторинг стану арматури в різних умовах впливу (Uthaman et al., 2019).

У роботі (Onyeachu et al., 2019) досліджувалась ефективність 2-(2-піридил)бензімідазолу (2PB) як інгібітора корозії CO_2 для сталі API X60 у статичних та гідродинамічних умовах. Експерименти проводилися в розчині бурової солі відповідно до

стандарту NACE ID196 при кімнатній температурі. Для кількісного визначення корозійної стійкості використовували електрохімічні методи, такі як електрохімічна імпедансна спектроскопія (EIS), лінійний поляризаційний опір (LPR) та потенціодинамічна поляризація (PDP). Поляризаційний опір вимірювався за допомогою методу LPR, який дозволяє оцінити зміну корозійного опору сталі при впливі корозійного середовища. Цей метод застосовувався як у статичних умовах, так і за умов гідродинамічного потоку, де зразки сталі піддавалися обертанню до 2000 об/хв. Результати показали, що за умов обертання корозійна стійкість сталі з 2PB значно зросла порівняно зі статичними умовами. Це пояснювалося посиленням перенесення інгібітора 2PB до поверхні сталі, що сприяло кращій адсорбції молекул інгібітора на поверхні металу. Аналіз методом ATR-IR показав, що 2PB адсорбується на сталі через N-H групу бензімідазольного кільця, утворюючи захисний бар'єр. Метод поляризаційного опору (LPR) виявився ефективним для оцінки корозійної стійкості сталі в різних умовах, дозволяючи кількісно визначити ступінь захисту, забезпеченого інгібітором. Отримані дані підтвердили, що 2PB значно підвищує корозійну стійкість, особливо за умов гідродинамічного впливу, що робить його перспективним «зеленим» інгібітором корозії для нафтогазової промисловості (Onyeachu et al., 2019).

У статті (Elgebaley et al., 2019) досліджували вплив електрохімічного вилучення хлоридів (ECE) на захист сталевих арматур в бетонних конструкціях від корозії, викликаній хлоридами. Основна увага приділялася зміні характеристик інтерфейсу сталь-бетон, зокрема поляризаційному опору, швидкості корозії та міцності зчеплення після обробки ECE. Дослідження охоплювало різні типи цементу, в тому числі звичайний портландцемент (CEM I 42.5N) з різним вмістом лугів та СЗА, а також змішаний цемент зі шлаком та з добавкою мікрокремнезему. Поляризаційний опір (LPR) використовували як один з основних показників для оцінки корозійної стійкості сталевих арматур. Його вимірювали методом лінійного поляризаційного опору, тобто не руйнівним методом вимірювання корозійної активності в бетоні до і після обробки ECE. Оцінку корозійної

стійкості проводили як для бетонів з внутрішнім джерелом хлоридів, так і для тих, що піддавалися зовнішньому впливу хлоридів. Результати показали, що обробка ЕСЕ є ефективною для видалення хлоридів з інтерфейсу сталь-бетон, що знижує корозійний струм і потенціал корозії. Проте, обробка ЕСЕ також вплинула на зниження міцності зчеплення між сталлю та бетоном, незалежно від типу цементу. Найбільш високу міцність і поляризаційний опір продемонстрував бетон із мікрокремнеземом, який забезпечував додаткову стійкість до корозії. Метод поляризаційного опору виявився ефективним для визначення змін у корозійній стійкості сталеві арматури після обробки ЕСЕ, дозволяючи точно оцінити ступінь корозійного захисту (Elgebaley et al., 2019).

У роботі (Irshad et al., 2022) досліджувалася ефективність композиту із сірки та високоструктурованого провідного вуглецю, який використовувався в якості катода в літій-сірчаних батареях, зокрема роль властивостей вуглецю, вмісту сірки та її розподілу у формуванні внутрішнього опору й здатності до розряду. Попри значну площу поверхні високоструктурованого провідного вуглецю, катода на його основі показали низьку швидкість розряду та високий поляризаційний опір. Поляризаційний опір катода оцінювався за допомогою електрохімічної імпедансної спектроскопії (EIS), яка дозволила розділити внески поляризаційного опору та заряду, що виникають під час різних процесів на широкому діапазоні часових шкал. Вимірювання EIS проводили при різних рівнях глибини розряду (DOD) з частотами від 100 кГц до 0,1 Гц при синусоїдальному збудженні 5 мВ. Перед вимірюванням комірки розряджалися на низькій швидкості (C/50), дозволяючи стабілізувати напругу перед кожним заміром імпедансу. Для аналізу отриманих даних використовувалась модель еквівалентної схеми з подальшим підбором параметрів. Використання вуглецю Ketjen-black у поєднанні з Super-P® забезпечує більш рівномірний розподіл активних компонентів, що зменшує поляризацію та покращує загальну електрохімічну ефективність батареї (Irshad et al., 2022).

У статті (AL-Ameeri et al., 2021) досліджено вплив карбонізації бетону на проникність хлоридів і швидкість корозії арматури в залізобетоні з тріщинами,

викликаними навантаженням. Проведено експерименти з використанням прискореного впливу CO₂ і хлоридів на бетонні зразки з різними співвідношеннями вода/цемент та ширинами тріщин. Метод поляризаційного опору використовувався для оцінки швидкості корозії, а потенціал пів-елемента застосовувався для визначення стану корозійної активності. Встановлено, що карбонізація та наявність тріщин суттєво підвищують проникність бетону для хлоридів і пришвидшують корозію арматури, що залежить від ширини тріщин та якості бетону (AL-Ameeri et al., 2021).

У роботі (Sohail et al., 2020) досліджувалася корозійна стійкість чотирьох типів арматури для залізобетону (низьковуглецева сталь, високоякісна сталь, сталь з епоксидним покриттям і високолегована хромована сталь) в суворих кліматичних умовах, зокрема під впливом циклічного замочування в розчині NaCl і висушування. Для оцінки корозійної швидкості використовували метод поляризаційного опору та електрохімічну імпедансну спектроскопію (EIS). Метод поляризаційного опору дозволив визначити опір до переносу заряду та порівняти рівень корозії серед різних матеріалів. Дослідження виявило, що сталь з епоксидним покриттям забезпечує найкращий захист від корозії навіть за наявності незначних пошкоджень покриття, а високолегована хромована сталь демонструє вищу стійкість до корозії, ніж низьковуглецева та високоякісна сталь. Використання цих матеріалів може значно збільшити довговічність бетонних конструкцій у агресивних середовищах (Sohail et al., 2020).

У статті (Pradipta et al., 2019) досліджували ефективність екстракту зеленого чаю як «зеленого» інгібітора корозії в порівнянні з комерційним інгібітором кальцію нітриту для сталеві арматури, зануреної в розчин хлоридів у цементному розчині. Використовували метод поляризаційного опору для визначення швидкості корозії. Було встановлено, що при рівній концентрації зеленого чаю і нітриту кальцію вони мають подібну ефективність (51–70%), але при однаковому об'ємі ефективність зеленого чаю була вище ніж нітриту кальцію (75–80% проти 14–24%). Зелений чай діяв як інгібітор корозії змішаного типу дії, збільшуючи поляризаційний опір і знижуючи анодний нахил,

утворюючи захисний шар на поверхні арматури. Основними компонентами, відповідальними за цю активність, були (-)-епігалокатехін галат, (-)-епікатехін галат і катехін (Pradipta et al., 2019).

Метод поляризаційного опору має значні переваги, які роблять його одним із найефективніших способів оцінки корозійних процесів. Він дозволяє швидко та точно визначати швидкість корозії в реальному часі без пошкодження досліджуваних матеріалів, що є важливим для моніторингу об'єктів у реальних умовах

експлуатації. Метод забезпечує можливість детального аналізу електрохімічних реакцій, дозволяючи досліджувати механізми корозії, оцінювати ефективність покриттів та інгібіторів корозії. Його можна використовувати як у статичних, так і в динамічних умовах, що робить його універсальним. Водночас метод має певні недоліки, серед яких висока чутливість до зовнішніх факторів, таких як температура, стан поверхні чи концентрація агресивного середовища (рис. 4).



Рис. 4. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу поляризаційного опору

Існують також інші прискорені електрохімічні методи визначення швидкості корозії, які належать до поляризаційних, і один із них – **циклічна вольтамперометрія**. Цей метод є модифікацією лінійної вольтамперометрії, у якій після досягнення певного потенціалу відбувається реверсування напрямку сканування, що дозволяє отримати інформацію про зворотні електрохімічні процеси. Циклічна вольтамперометрія виконується шляхом поступового підвищення потенціалу з часом (лінійний розгін) до заданого значення – потенціалу реверсу. Після досягнення цієї точки потенціал починає змінюватися у зворотному напрямку, створюючи симетричний трикутний профіль (Bard & Faulkner, 2001). Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу циклічної вольтамперометрії зазначені на рис. 5.

Ще одним електрохімічним методом визначення швидкості корозії є метод **імпедансної спектроскопії**. Цей метод базується на застосуванні сигналу змінного струму або напруги до робочого електрода з подальшим визначенням його реакції. До робочого електроду прикладають синусоїдальний сигнал і вимірюють його вихідну реакцію струму або напруги на різних частотах при різних умовах, таких як різна температура, і інше. Потенціостат обробляє вимірювання струму та напруги в часі, створюючи серію значень імпедансу для кожної аналізованої частоти. Цей набір значень імпедансу та частот відомий як «імпедансний спектр» (Canales, 2022; Karmakar, 2024). Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою даного методу зазначені на рис. 6.



Рис. 5. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу циклічної вольтамперометрії



Рис. 6. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу імпедансної спектроскопії

Останнім електрохімічним методом визначення швидкості корозії в даній роботі буде розглянуто метод **хронопотенціометрії**. Хронопотенціометрія – електрохімічна техніка, при якій контрольований постійний струм протікає між електродами, а потенціальна відповідь вивчається як функція часу відносно відповідного еталонного електроду. Перевага цієї техніки над хроноамперометрією полягає в корекції омичного ефекту, який є неминучим в електрохімічних процесах. Оскільки омичний ефект тут постійний, викривлення хронопотенціограм можна виправити, застосувавши постійне потен-

ціальне зміщення. На відміну від хроноамперометрії, де струм є залежною змінною, в хронопотенціометрії щільність струму можна варіювати для отримання бажаного перехідного часу, який є ключовим параметром досліджень (Chowdhury et al., 2017). Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою цього методу зазначені на рис. 7.

Враховуючи переваги й обмеження методів вимірювання швидкості корозії можна зробити висновок, що метод поляризаційного опору виглядає найперспективнішим для розвитку і подальшого впровадження в практику.



Рис. 7. Переваги і недоліки вимірювання швидкості корозії за допомогою методу хронопотенціометрії

Висновки

У даній роботі було проведено аналіз різних методів дослідження корозійної стійкості металів, таких як масометрія, імпедансна спектроскопія, метод поляризаційного опору, хронопотенціометрія та циклічна вольтамперометрія. Масометрія є простим і доступним методом, але вона потребує тривалого часу для проведення експериментів і не дозволяє отримати динамічну інформацію про процеси корозії. Імпедансна спектроскопія забезпечує широкий спектр даних про корозійні процеси, проте потребує спеціального обладнання і складного аналізу результатів. Метод поляризаційного опору виділяється як перспективний завдяки можливості швидкого визначення швидкості корозії з мінімальним впливом на систему. Він також дозволяє отримувати

точні результати в режимі реального часу, що робить його особливо цінним для моніторингу корозії в польових умовах. Хронопотенціометрія дозволяє спостерігати за кінетикою процесів на поверхні металу, проте вимагає точного регулювання умов експерименту і специфічного обладнання. Циклічна вольтамперометрія дає змогу досліджувати механізми корозії та електрохімічні процеси, але її результати залежать від багатьох факторів, зокрема від стану поверхні електрода і точності інструментів. Отже, хоча кожен із методів має свої переваги й обмеження, метод поляризаційного опору виглядає найперспективнішим для розвитку і подальшого впровадження в практику, оскільки він забезпечує оптимальне співвідношення між точністю, швидкістю та можливістю використання в реальних умовах.

Фінансування / Funding

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується / Not applicable.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflicts of Interest

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів / The authors declare no conflicts of interest.

References

- AL-Ameeri, A. S., Rafiq, M. I., & Tsioulou, O. (2021). Combined impact of carbonation and crack width on the Chloride Penetration and Corrosion Resistance of Concrete Structures. *Cement and Concrete Composites*, 115, 103819. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103819>
- Aslam, J., Aslam, R., Alrefae, S. H., Mobin, M., Aslam, A., Parveen, M., & Hussain, C. M. (2020). Gravimetric, electrochemical, and morphological studies of an isoxazole derivative as corrosion inhibitor for mild steel in 1M HCl. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(11), 7744-7758. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.09.008>
- Bard, A. J., Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. Department of Chemistry and Biochemistry University of Texas at Austin., 239-243. From <https://tinyurl.com/4sb74md3>
- Bik, M. V., Buket, O. I., & Vasyliiev, H. S. (2018). *Metody zakhystu obladnannia vid korozii ta zakhyst na stadii proektuvannia*. KPI im. Ihoria Sikorskoho. (in Ukrainian) <https://tinyurl.com/5yfy2zy2>
Бик М. В., Букет О. І., Васильєв Г. С. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 318 с. <https://tinyurl.com/5yfy2zy2>
- Canales, C. P. (2022). C. Electrochemical Impedance Spectroscopy and Its Applications. *21st Century Nanostructured Materials—Physics, Chemistry, Classification, and Emerging Applications in Industry, Biomedicine, and Agriculture*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101636>
- Chowdhury, N. R., Kumar, R., & Kant, R. (2017). Theory for the chronopotentiometry on rough and finite fractal electrode: Generalized Sand equation. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 802, 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.08.039>
- El Ibrahim, B., & Berdimurodov, E. (2023). Weight loss technique for corrosion measurements. In *Electrochemical and Analytical Techniques for Sustainable Corrosion Monitoring* (pp. 81-90). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15783-7.00011-6>
- Elgebaley, R., Elshazly, Y., & Elsalamawy, M. (2019). Role of cement type on performance change of reinforcing steel due to chloride extraction. *Construction and Building Materials*, 208, 444-453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.022>
- Elhady, S., Zaki, E. G., El-Azabawy, O. E., & Fahim, I. S. (2024). Electrochemical evaluation of green corrosion inhibitor based on ground coffee waste in Petroleum fields. *Results in Engineering*, 21, 101880. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101880>
- Irshad, A., Elizalde-Segovia, R., Jayathilake, B. S., Zayat, B., & Narayanan, S. R. (2022). Understanding the Role of Carbon Mixtures on the Polarization of Sulfur Electrodes in Lithium-Sulfur Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 169(11), 110528. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac9c35>
- Karmakar, S. (2024). Impedance Spectroscopy for Electroceramics and Electrochemical System. *arXiv preprint arXiv:2406.15467*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.15467>
- Kesari, P., & Udayabhanu, G. (2023). Investigation of Vitamin B12 as a corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution through gravimetric and electrochemical studies. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(4), 101920. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101920>
- Khaldoune, M., Hafid, H., Allaoua, N., Khiari, A., & Gherraf, N. (2023). Gravimetric and electrochemical investigation of the impact of various factors on xc48 carbon steel corrosion in different environments. *Revue roumaine de chimie*, 68(9), 453-462. <https://doi.org/10.33224/rrch.2023.68.9.06>

Loto, C. A., Fayomi, O. S. I., Loto, R. T., & Popoola, A. P. I. (2019). Potentiodynamic Polarization and Gravimetric Evaluation of Corrosion of Copper in 2M H₂SO₄ and its inhibition with Ammonium Dichromate. *Procedia Manufacturing*, 35, 413-418. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.061>

Loto, R. T., Loto, C., & Ohwofasa, O. (2021, March). Gravimetric and data analysis of the corrosion resistance behaviour and inhibition of C26000 brass in dilute HNO₃ solution. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1117, No. 1, p. 012002). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1117/1/012002>

Ofoegbu, S. U. (2021). Comparative gravimetric studies on carbon steel corrosion in selected fruit juices and acidic chloride media (HCl) at different ph. *Materials*, 14(16), 4755. <https://doi.org/10.3390/ma14164755>

Onyeachu, I. B., Obot, I. B., Sorour, A. A., & Abdul-Rashid, M. I. (2019). Green corrosion inhibitor for oilfield application I: Electrochemical assessment of 2-(2-pyridyl) benzimidazole for API X60 steel under sweet environment in NACE brine ID196. *Corrosion Science*, 150, 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.02.010>

Pradipta, I., Kong, D., & Tan, J. B. L. (2019). Natural organic antioxidants from green tea inhibit corrosion of steel reinforcing bars embedded in mortar. *Construction and Building Materials*, 227, 117058. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117058>

Roberge, P. R. (2008). Corrosion engineering: principles and practice. (No Title). From <https://lccn.loc.gov/2008005204>

Sayyid, F. F., Mustafa, A. M., Ibrahim, S. I., Mohsin, M. K., Hanoon, M. M., Al-Kaabi, M. H., ... & Al-Amiery, A. A. (2023). Gravimetric Measurements and Theoretical Calculations of 4-Aminoantipyrine Derivatives as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution: Comparative Studies. *Corrosion Science and Technology*, 22(2), 73-89. <https://doi.org/10.14773/cst.2023.22.2.73>

Sohail, M. G., Kahraman, R., Alnuaimi, N. A., Gencturk, B., Alnahhal, W., Dawood, M., & Belarbi, A. (2020). Electrochemical behavior of mild and corrosion resistant concrete reinforcing steels. *Construction and Building Materials*, 232, 117205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117205>

Stoev, P. I., Lytovchenko, S. V., Girka, I. O., & Hrytsyna, V. T. (2019). *Chemical corrosion and protection of metals: Textbook*. V. N. Karazin Kharkiv National University. (in Ukrainian) <https://tinyurl.com/m3ux5k96>

Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник / [П. І. Стоєв, С. В. Литовченко, І. О. Гірка, В. Т. Грицина]. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с. <https://tinyurl.com/m3ux5k96>

Ugi, B. U. (2020). Effects of nitrogen atoms in vindoline alkaloids as Fe²⁺ ions inhibitor in corrosion of gray iron in dilute HCl environment: potentiodynamic polarization, gravimetric analysis and SEM. *Journal of Materials and Environmental Science*, 11(8), 1274-1285. From https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol11/vol11_N8/JMES-2020-111119-Ugi.pdf

Uthaman, S., George, R. P., Vishwakarma, V., Harilal, M., & Philip, J. (2019). Enhanced seawater corrosion resistance of reinforcement in nanophase modified fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 221, 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.070>

Zinad, D. S., Jawad, Q. A., Hussain, M. A. M., Mahal, A., Mohamed, L., & Al-Amiery, A. A. (2020). Adsorption, temperature and corrosion inhibition studies of a coumarin derivatives corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium: gravimetric and theoretical investigations. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 9(1), 134-151. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-1-8>

Ви можете цитувати цю статтю так:

Гуменюк О., Трус І. Аналіз сучасних методів вимірювання швидкості корозії. *Biota. Human. Technology*. 2025. №1. С. 197-210.

Cite this article in APA style as:

Humeniuk, O., & Trus I. (2025). Analysis of modern corrosion rate measurement methods. *Biota. Human. Technology*, 1, P. 197-210. (in Ukrainian)

Information about the authors:

Humeniuk O. [*in Ukrainian: Гуменюк О.*] ¹, PhD student, e-mail: alexei.humeniuk@gmail.com
ORCID: 0009-0001-8655-1334
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
37 Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056

Trus I. [*in Ukrainian: Трус І.*] ², Dr. Sci., Associate Professor, e-mail: inna.trus.m@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6368-6933 Scopus Author ID: 56152219600
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
37 Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056

¹ Data collection, manuscript preparation.

² Study design, manuscript preparation.