

Г. С. Васильєв, А. В. Бровченко, Ю. С. Герасименко

ВПЛИВ ПРОДУКТІВ КОРОЗІЇ НА ВИМІРЮВАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ОПОРУ У ХОЛОДНІЙ ВОДОГІННІЙ ВОДІ

Досліджено корозійну поведінку сталі 3 у холодній водогінній воді (18 °С). Встановлено, що при тривалості експозиції сталевих електродів у воді до 6 тижнів виникає розходження між результатами масометрії та поляризаційного опору до 3 разів через утворення оксидгидроксида заліза – β -FeOOH. Оксидгидроксида зафіксовано методами ІЧ-спектроскопії та XRD. Пропонується корегувати результати вимірювання швидкості корозії методом поляризаційного опору враховуючи вплив продуктів корозії.

ВСТУП

Забезпечення населення гарячою водою належної якості є важливою складовою функціонування сучасних міст. Однією із основних причин погіршення якості води є внутрішня корозія труб [1]. Не дивлячись на існуючі методи захисту (емалювання та цинкування внутрішньої поверхні труб) на практиці ці методи часто дають незадовільні результати, що призводить до погіршення якості та перебоїв у постачанні води [2].

Вирішення корозійних проблем слід починати з налагодження корозійного моніторингу, метою якого є отримання інформації про поточну швидкість корозії для прогнозування та попередження можливих аварій. Найбільш придатними є оперативні методи, що визначають швидкість корозії в реальному часі. Серед них метод поляризаційного опору [3] набув найбільшого поширення через простоту обладнання, можливість автоматизації та коротку тривалість отримання результату [4, 5].

Застосування традиційного методу поляризаційного опору для визначення швидкості корозії у водогінній воді пов'язане з декількома ускладненнями. По-перше, при вимірюванні слід враховувати опір розчину, що є достатньо високим порівняно із опором розчинів кислот, для яких початково і розроблявся метод поляризаційного опору [6]. Це завдання виконується застосуванням гальваностатичної схеми вимірювання з автоматичною компенсацією опору розчину [7]. По-друге, у водних нейтральних розчинах відбувається накопичення продуктів корозії на поверхні металу, що призводить до зростання поляризаційної ємності і створює невизначеність тривалості поляризації [8]. Проблеми пов'язані із поляризаційною ємністю можна вирішити застосовуючи двоступінчатий метод [9] або інші підходи, засновані на аналізі кривої відгуку струму на прикладання потенціалу [10].

При використанні всіх зазначених підходів до визначення швидкості корозії сталі методом поляризаційного опору все одно залишається відмінність від результатів традиційного методу масометрії в бік завищення результатів [11]. Пояснити таку розбіжність не вдається в рамках розглянутих підходів. У загальному вигляді приймається, що при вимірюванні поляризаційного опору сталевому електроду, який кородує у водному нейтральному середовищі, відбувається незначна катодна та анодна поляризації (до 10-15 мВ). Катодний струм йде на відновлення кисню, анодний – на окиснення заліза до заліза (II). Продукти корозії заліза приймаються як інертні речовини, що не беруть участі в електрохімічних процесах. Останнім часом набуває актуальності підхід, в якому

приймається до уваги можливість суміжного протікання декількох реакцій на поверхні кородуючого металу, зокрема за участю продуктів корозії.

В роботах за останні роки показано, що плівки продуктів корозії мають складну структуру та постійно зазнають перетворень [12], і головне, деякі сполуки проявляють електрохімічну активність. Таким чином, струм, при вимірюванні поляризаційного опору, витрачається на процеси, що не враховуються при виведенні теоретичних рівнянь [13], а тому визначений поляризаційний опір є нижчим, ніж мав би бути лише для відповідного корозійного процесу. Неправильне визначення швидкості корозії може привести до невірних прогнозування корозійної поведінки, передозування засобів захисту та інших небажаних наслідків.

Метою даної роботи було кількісно визначити вплив електрохімічно активних продуктів корозії на визначення швидкості корозії сталі 3 методом поляризаційного опору у холодній воді та виробити рекомендації щодо корекції результатів вимірювання.

МЕТОДИКА

Для корозійних випробувань застосовували методи масометрії, потенціодинамічних поляризаційних кривих та поляризаційного опору.

Зразки зі сталі 3 виготовляли у формі циліндрів довжиною 30 мм і діаметром 6 мм. Для струмопідведення з одного боку зразка нарізали різьбу. Поверхню зразка зачищали наждаковим папером SiC марки P240.

Елементний склад сталі приведений у таблиці 1.

Таблиця 1

Вміст елементів, $\times 10^2$ %								
Марка сталі	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
3	16	56	6,9	3,9	2,2	3,9	1,6	3,2

В якості розчину для корозійних випробувань використовували водогінну воду Солом'янського району м. Києва. Склад цієї води є типовим для населених пунктів басейну р. Дніпро. Основні показники складу води наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Показники складу водогінної води			
Параметр		Одиниці вимірювання	Значення
Жорсткість загальна	Ж _з	mg-equiv/dm ³	3,9-4,2
Лужність загальна	Л _з	mg-equiv/dm ³	3,9-4,1
Кальцій	Ca ²⁺	mg-equiv/dm ³	3,0-3,1
Магній	Mg ²⁺	mg-equiv/dm ³	0,9-1,1
Хлориди	Cl ^{r-}	mg/dm ³	10-20
Сульфати	SO ₄ ²⁻	mg/dm ³	30-35
Гідрокарбонати	HCO ₃ ⁻	mg-equiv/dm ³	3,2-3,5
Загальний солеміст	С.З.	mg/dm ³	240-260
Водневий показник	pH		7,4

Масометричні вимірювання були проведені згідно [14]. Зразки зважували з точністю до 0,0001 г до і після експерименту. Після витримки у водогінній воді

рихлі продукти корозії, що утворилися на поверхні зразка видаляли м'якою гумкою. Міцно зчеплені зі сталлю тверді продукти корозії видаляли травленням зразків протягом 20 хв. у розчині, що містив $100 \text{ g/dm}^3 \text{ H}_2\text{SO}_4$ і 5 g/dm^3 тіосечовини в якості інгібітору корозії [15]. Тривалість експерименту становила – 2, 4, 6 тижні. За даними випробувань визначали глибинний показник швидкості корозії (K_n).

Поляризаційні криві знімали на свіжезачищених зразках на потенціостаті ПИ-50-1.1 з комп'ютерною реєстрацією при температурі $18 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ у комірці об'ємом 150 cm^3 за відсутності перемішування. Використовувалася традиційна триелектродна схема: робочий електрод – сталь 3 (площа $0,5 \text{ cm}^2$), електрод порівняння – хлор-срібний насичений ($E = 0,222 \text{ V/NHE}$), допоміжний електрод – платинова пластина площею 8 cm^2 . Швидкість розгортки потенціалу – $0,5 \text{ mV/s}$, діапазон сканування потенціалу $\pm 300 \text{ mV}$ від потенціалу вільної корозії.

Вимірювання поляризаційного опору проводили із використанням індикатора поляризаційного опору ПІК-1, що працює за гальваностатичним принципом. ПІК-1 є аналогом індикатора поляризаційного опору P5126, використання якого передбачене ГОСТ [16]. В якості первинного перетворювача використовували двохелектродний датчик, електроди якого виготовлялися із сталі 3. Початкова різниця потенціалів і омичні втрати в розчині автоматично компенсувалися в ході вимірювання. З метою зниження впливу поляризаційної ємності в процесі вимірювання на результати у приладі використано двоступінчатий метод вимірювання [9]. В комірку об'ємом 1200 cm^3 були встановлені 6 датчиків. Тривалість експерименту сягала 42 днів.

Заміри поляризаційного опору проводили двічі на тиждень. Результати вимірювання перераховували у швидкість корозії застосовуючи константу перерахунку $B = 26 \text{ mV}$ [13]. Криві залежності швидкості корозії, визначеної за методом поляризаційного опору, від часу інтегрували та визначали середньоінтегральне значення швидкості корозії за кожен тиждень.

Вплив оксигідроксидів заліза на вимірювання швидкості корозії методом поляризаційного опору визначали за методикою, детально розглянутою в [17]. Суть її полягає у вимірюванні поляризаційного опору в аерованому та деаерованому розчині. Вважається, що в деаерованому розчині практично відсутня реакція відновлення кисню. Швидкість корозії визначали спочатку в аерованому розчині I_P^{aer} , потім в деаерованому I_P^{deaer} . Швидкість корозії з кисневою деполаризацією знаходили як різницю між I_P^{aer} та I_P^{deaer} , $I_P^{\text{O}_2} = (I_P^{\text{aer}} - I_P^{\text{deaer}})$.

Деаерацію проводили пропусканням аргону ($w(\text{Ar}) = 99,999 \%$) протягом 2-ох годин до завантаження зразків та ще 4-ох годин після завантаження у комірку (рис. 1.).

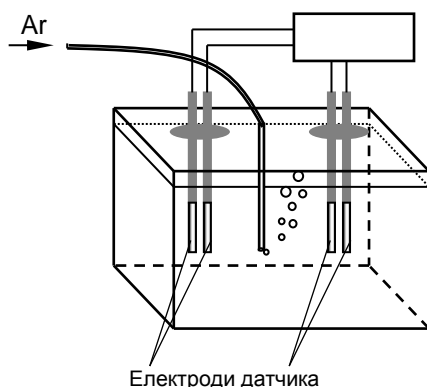


Рис. 1. Схема установки для вимірювання поляризаційного опору при деаерації

Аналіз шарів продуктів корозії виконували методами ІЧ-спектроскопії та XRD. Електроди вилучали з досліджуваного розчину, промивали у дистильованій воді та висушували у потоці теплого повітря. Продукти корозії для аналізу знімали з поверхні електродів скальпелем та зберігали у герметичній пластиковій ємності до проведення аналізу.

ІЧ-спектри знімали на спектрометрі Spectrum BX-FT IR Perkin Elmer в області $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ з використанням таблеток з KBr.

Рентгенограми знімали за методом Брег-Брентано з використанням дифрактометра Shimadzu LabX XRD 6000 (Cu K α випромінювання, 40 кВ и 30 мА, графітовий монохроматор). Дифрактограми були отримані в діапазоні кутів $2\theta = 20\text{--}50^\circ$, крок сканування – $0,02^\circ$, тривалість кроку сканування – 1 с.

В ході досліджування щотижня проводили заміну води. Воду, яку заміняли, аналізували за показниками рН (скляним електродом) та загальної жорсткості (титриметрично за ГОСТ) до та після заміни.

РЕЗУЛЬТАТИ

Фото зразків у вихідному стані та після 2, 4, 6 тижнів експозиції наведено на рис. 2. На фото видно рожево-коричневі продукти корозії, що вкривають поверхню електродів. На поверхні є ділянки, що вкриті дрібними кристалами, які відрізняються за зовнішнім виглядом від продуктів корозії. Спостерігається збільшення кількості продуктів корозії з часом експозиції. Після перших двох тижнів на електродах ще видно металічний блиск вихідної поверхні, а у кінці 6 тижня – поверхня повністю вкрита шаром осадів.

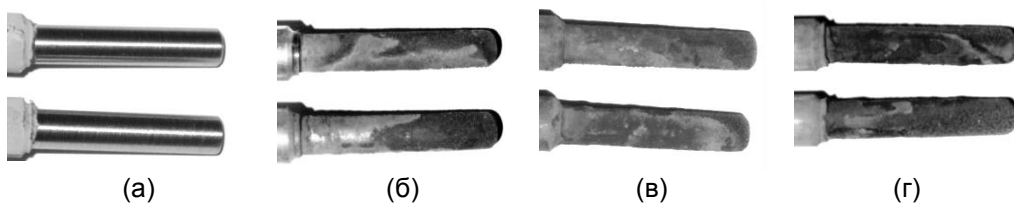


Рис. 2 – Фото поверхні електродів:
а – вихідний стан; б – через 2 тижні; в – через 4 тижні; г – через 6 тижнів.

Для визначення кінетичних характеристик та константи перерахунку поляризаційного опору у швидкість корозії знімали поляризаційні криві (рис. 3).

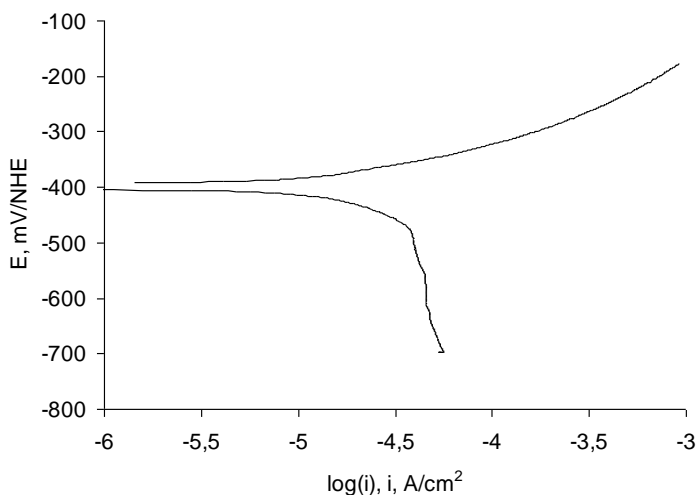


Рис. 3. Поляризаційні криві сталевго електроду у водогінній воді при 18 °С.

Поляризаційна крива підтвердила дані про те, що маловуглецева сталь 3 у водогінній воді кородує з кисневою депольаризацією, швидкість визначається дифузійною швидкістю кисню на кородуючій поверхні, а константа перерахунку поляризаційного опору у швидкість корозії $B = b_2/2,3$ становить 26 мВ [13].

Криві залежності середньоінтегральної швидкості корозії, визначеної методом поляризаційного опору, та швидкості корозії, визначеної масометрично наведено на рис. 4.

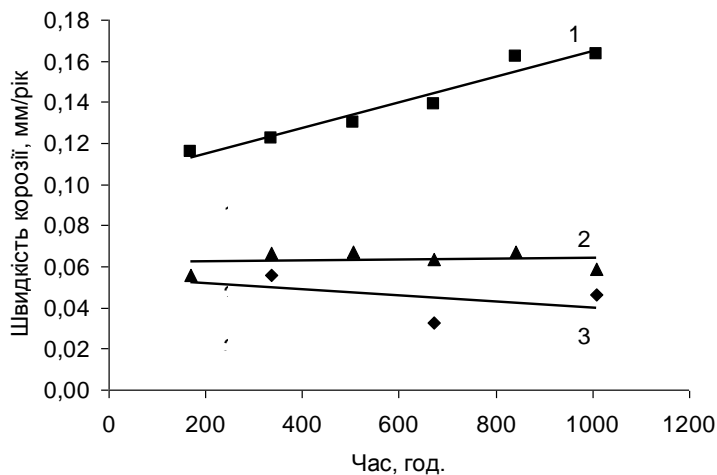


Рис. 4. Залежності швидкості корозії від часу: 1 - I_p^{aer} ; 2 - I_p^{deaer} ; 3 – Кл.

ІЧ-спектри продуктів корозії, знятих із поверхні зразків через 2, 4, 6 тижнів експозиції наведено на рис. 5. Вертикальними лініями зазначено частоти поглинання що відповідають : β -FeOOH – акагеніт та γ -FeOOH – лепідокрокіт. Зі збільшенням часу експозиції кількість β -FeOOH збільшується, про що свідчить збільшення піку в області 861 cm^{-1} .

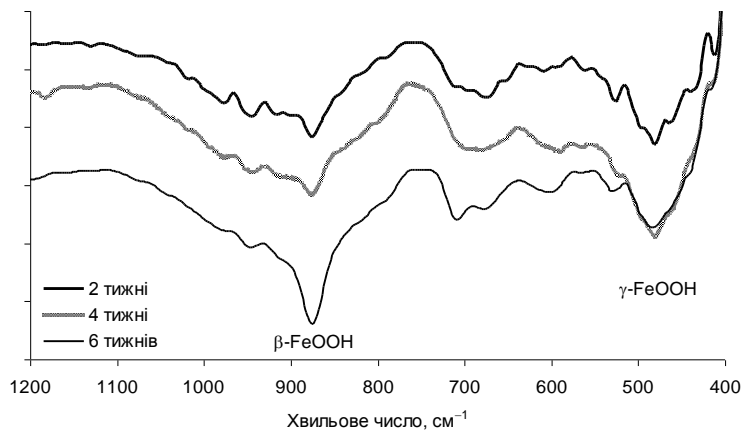


Рис. 5. ІЧ-спектри осадів.

Рентгенограма порошку продуктів корозії наведено на рис. 6. Згідно рентгенограм основними кристалічними компонентами шару продуктів корозії є гетит та карбонат кальцію в структурі кальциту. Саме кристали карбонату кальцію добре спостерігаються на фото поверхні поряд із бурими продуктами корозії заліза (рис. 2).

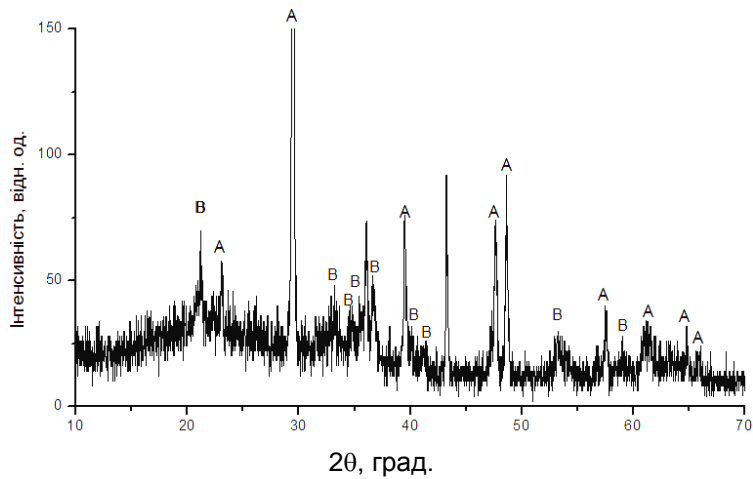


Рис. 6. Рентгенограма осаду: (A) – кальцит (CaCO_3) та (B) – гетит ($\alpha\text{-FeOOH}$).

Результати аналізу складу води наведено на рис. 7. Після кожного тижня відбувається зниження загальної жорсткості та збільшення рН розчину.

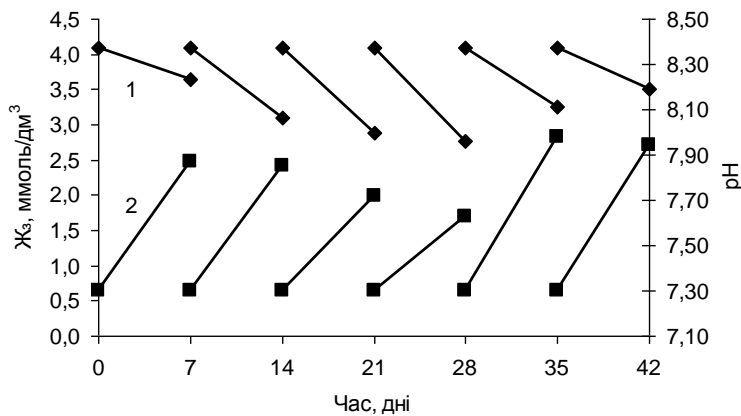


Рис. 7. Зміна pH (1) та Жс (2) в ході дослідження

ОБГОВОРЕННЯ

Утворення поверхневих шарів

При завантаженні свіжезачищеного сталевого зразка до комірки, що заповнена водогінною водою та знаходиться за вільного доступу кисню починається електрохімічна корозія металу. В місцях, що є більш доступними для дифузії кисню, локалізуються катодні зони, на яких переважно протікає реакція електрохімічного відновлення кисню:

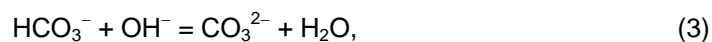


На анодних зонах відбувається іонізація заліза до іонів Fe^{2+} :



Перебіг цих реакцій відображають поляризаційні криві (рис. 3.). Катодна крива є типовою для відновлення кисню на граничному струмі – процес лімітується доставкою молекул O_2 до поверхні, $i_d = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ A/cm}^2$. Анодна крива відображає електрохімічну поведінку заліза. Визначений корозійний потенціал $E_c = -405 \text{ мВ/НВЕ}$.

Продукти реакцій (1) та (2), вступають у подальші хімічні перетворення. Збільшення концентрації іонів гідроксиду поблизу катодних зон призводить до зміщення вуглекислової рівноваги в бік утворення іонів карбонату:



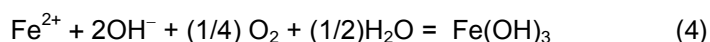
Надлишок іонів CO_3^{2-} випадає в осад карбонату кальцію. Такий хід процесу наводиться в багатьох роботах по темі карбонатних осадів [18-20].

Утворення кристалічного карбонату кальцію підтверджується зменшенням жорсткості води та збільшенням pH (рис. 5) внаслідок нейтралізації вугільної кислоти. На рентгенограмі (рис. 6) найбільш інтенсивними є піки, що відповідають саме карбонату кальцію в структурі кальциту, із включенням в кристалічну ґратку магнію $(\text{Mg}_{0,03}\text{Ca}_{0,97})(\text{CO}_3)$.

Розподіл поверхні на зони спостерігається вже після перших днів експозиції. Він зберігається протягом всього дослідження. Катодні зони переважно вкриті кристалами кальциту, на них практично відсутні продукти корозії, в той час як анодні зони вкриті шаром бурого осаду (рис. 2).

Через блокування шаром осаду кальциту катодних ділянок від доступу кисню відбувається значне гальмування корозії (катодний контроль). За результатами масометрії, глибинний показник швидкості корозії K_n знаходиться на рівні 0,05 мм/рік, що характерно для корозії маловуглецевих сталей у нейтральному водному середовищі [21]. Таке значення досягається вже після 2 тижнів експозиції та в подальшому змінюється незначно (стаціонарна корозія). В той же час, швидкість корозії, визначена з поляризаційних кривих на свіжезачищеній поверхні є більшою у 9,5 разів.

Анодні зони є джерелом іону Fe^{2+} , але його накопичення в приелектродному шарі не відбувається через високу швидкість хімічного окиснення до Fe^{3+} киснем повітря з подальшим гідролізом до важкорозчинного гідроксиду ($DP(Fe(OH)_3) = 10^{-38}$).



У процесі старіння гідроксиду заліза $Fe(OH)_3$ втрачається молекула води з утворенням оксогідроксиду [12].



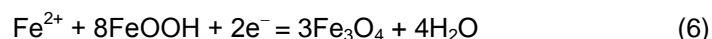
Наявність $FeOON$ підтверджується результатами ІЧ-спектоскопії вже після 2 тижнів експозиції та результати XRD. В умовах експерименту утворюються: β - $FeOON$ – акагеніт, гетит – β - $FeOON$ та γ - $FeOON$ – лепідокрокіт. Про наявність цих сполук на поверхні кородуючої сталі повідомляється в роботах [22]. З часом експозиції від 2 до 6 тижнів кількість гетиту збільшується, про що свідчить збільшення піку в області 861 cm^{-1} (рис. 5). Перетворення на поверхні металу впливають і на електрохімічну поведінку сталі.

Вплив поверхневих шарів на вимірювання поляризаційного опору

При вимірюванні поляризаційного опору індикатором ПІК-1 через два електроди пропускається гальваностатичний імпульс струму, що викликає незначну поляризацію електродів – до 10-15 мВ. На початку досліду, коли поверхня сталі свіжезачищена (рис. 2), на одному з електродів струм витрачається на катодну реакцію (2), що протікає з дифузійними обмеженнями, на іншому електроді – на анодну реакцію (1), що протікає з електрохімічними обмеженнями. При утворенні осаду кальциту на поверхні електродів відбувається блокування поверхні катодних зон від доступу кисню. Це призводить до зниження швидкості реакції (2), зростання поляризаційного опору та, відповідно, зниження швидкості корозії. Після першого тижня середньоінтегральне значення швидкості корозії, визначеної методом поляризаційного опору, має мінімальне значення і становить 0,116 мм/рік (рис. 4).

З часом, відповідно до даних ІЧ-спектоскопії (рис. 5), в шарі продуктів корозії відбувається накопиченням акагеніту β - $FeOON$. На кривій залежності швидкості корозії I_p^{aer} від часу (рис. 4) спостерігається зростання швидкості корозії. На відміну від цього, значення K_n , визначені методом масометрії, залишаються на постійному рівні – 0,05 мм/рік.

На нашу думку, пояснити таку відмінність результатів можна електрохімічною активністю продуктів реакції (5). На електроді протікає ще одна електрохімічна реакція, на яку витрачається струм при вимірюванні R_p [17]:



Протікання додаткової реакції підтверджують досліди при деаерації розчину. Середньоінтегральна швидкість корозії в аерованому розчині, визначена методом поляризаційного опору I_p^{aer} , зростає з часом експозиції від 0,116 до 0,163 мм/рік. Середньоінтегральна швидкість корозії з кисневою деполаризацією $I_p^{\text{O}_2}$ є меншою і дещо знижується з часом експозиції від 0,05 до 0,04 мм/рік. Результати масометрії $K_{\text{П}}$ відповідають $I_p^{\text{O}_2}$.

Доля кисневої деполаризації (відношення $(I_p^{\text{aer}} - I_p^{\text{deaer}}) / I_p^{\text{aer}}$) від часу експозиції наведена на рис. 8.

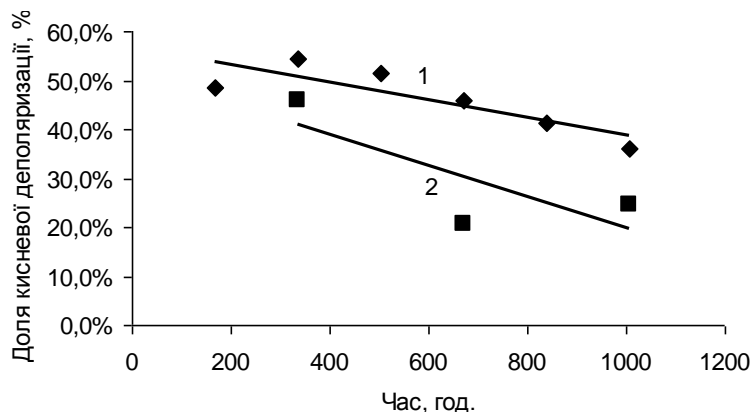


Рис. 8. Залежність долі кисневої деполаризації від часу експозиції, визначеної: 1 – методом поляризаційного опору, $(I_p^{\text{aer}} - I_p^{\text{deaer}}) / I_p^{\text{aer}}$; 2 – методом масометрії ($K_{\text{П}} / I_p^{\text{aer}}$).

Найвища доля кисневої деполаризації, 50-55%, фіксується у перший тиждень досліду. З часом ця величина знижується до 36% після 5 тижнів. Для порівняння, на графіку наведено результати масометрії ($K_{\text{П}} / I_p^{\text{aer}}$), що задовільно узгоджуються з результатами електрохімічних вимірювань. Зниження долі кисневої деполаризації відбувається разом із збільшенням кількості акагеніту на поверхні електроду згідно даних ІЧ-спектроскопії, збільшення піку поглинання в області 861 см^{-1} (рис. 5).

Таким чином, в процесі старіння продуктів корозії утворюються оксигідроксиди заліза, що здатні проявляти електрохімічну активність. В умовах дослідів даної роботи зафіксовано утворення гетиту – $\alpha\text{-FeOOH}$, акагеніту – $\beta\text{-FeOOH}$ та лепідокрокіту – $\gamma\text{-FeOOH}$. В процесі вимірювання поляризаційного опору не враховується витрата струму на цю реакцію і значення швидкості корозії завищуються у 2-3 рази при збільшенні тривалості експозиції від 2 до 6 тижнів.

Використання традиційного методу поляризаційного опору в умовах наявності на поверхні металу продуктів корозії можливе, але тільки за умови введення певних поправок та застережень. Із даних, отриманих в даній роботі, можна рекомендувати використання методу поляризаційного опору для виконання корозійного моніторингу після 4 тижнів експозиції свіжезачищеного металу. При цьому виміряне значення швидкості корозії слід помножити на корегуючий коефіцієнт $K = 0,3$. Це дозволить оцінити дійсне значення швидкості корозії, що відповідає значенню масометрії.

Висновки

1. Використання традиційного методу поляризаційного опору для вимірювання швидкості корозії у водогінній воді призводить до підвищення результатів вимірювання порівняно із дійсним значенням швидкості корозії визначеного методом масометрії.
2. Розходження значень швидкості корозії визначених методами поляризаційного опору та масометрії пояснюється утворенням та накопиченням на поверхні металу електрохімічно активних оксогідроксидів заліза, зокрема акагеніту β -FeOOH, виявлених методами ІЧ-спектроскопії та XRD. Доля струму, що йде на електрохімічні перетворення продуктів корозії, згідно результатів вимірювання поляризаційного опору, збільшується з часом до 64%.
3. Використання методу поляризаційного опору для вимірювання швидкості корозії маловуглецевої сталі під шаром продуктів корозії можливе при введенні поправочного коефіцієнта К. При тривалості експозиції більше 4 тижнів К становить 0,3.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Герасимчук Н. В. Оценка водно-химического режима систем теплоснабжения на примере некоторых городов западно-сибирского региона / Герасимчук Н. В., Мельков В. И. // Вестник ТГАСУ. – 2006. – № 1. – С. 84-89.
2. К вопросу о состоянии сетей водоснабжения Харькова / Гончаренко Д. Ф., Старкова О. В., Вевеллер Х., Алейникова А. И., Паболкова Е. В. // Коммунальное хозяйство городов. – 2010. – № 95. – С. 55-59.
3. Чвірук В. П. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ / В. П. Чвірук, С. Г. Поляков, Ю. С. Герасименко. – К. : Академперіодика, 2007. – 324 с.
4. Innovations in corrosion monitoring // World Pumps. – 2005. – November. – P. 20-24.
5. Andrade C. Alonso C. Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site // Construction and building materials. – 1996. – Vol. 10, № 5. – P. 315-328.
6. Stern M., Geary A. L. // J. Electrochem. Soc. – 1957. – Vol. 104, № 1. – P. 56-63.
7. Коррозионно-индикаторная установка УК-1 / Герасименко Ю. С., Сорокин В. И., Руденко А. К., Абросимов В. С. // Защита металлов. – 1986. – Т. 22, № 2. – С. 305-308.
8. Борискин А. В. Поляризационная емкость корродирующих стальных электродов / Борискин А. В., Герасименко Ю. С. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. вип. - 2004. – № 4. – № 1. – С. 41-46.
9. Herasymenko Yu. S. A two-step method for the evaluation of corrosion rate in metals / Herasymenko Yu. S., Vasylyev H. S. // Materials Science. – 2009. – Vol. 45, № 6. – P. 899-904.
10. Feliu V. Corrosion estimates from the transient response to a potential step / Feliu V., Gonzalez J. A., Feliu S. // Corrosion science. – 2007. – Vol. 49, № 8. – P. 3241-3255.
11. Vasylyev G. S. Limitations of application of the conventional polarization resistance method for corrosion rate MEASUREMENTS of rusted steel / Vasylyev G. S., Gerasimenko Y. S., Vassilyeva O. Yu. // Збірка тез доповідей учасників IV Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології (Київ). – К., 2012. – С.122.

12. Hiroki Tamura. The role of rusts in corrosion and corrosion protection of iron and steel // *Corrosion Science*. – 2008. – Vol. 50, № 7. – P. 1872-1883.
13. Мансфелд Ф. Определение тока коррозии методом поляризационного сопротивления // *Достижения науки о коррозии и технологии защиты от нее* / под ред. М. Фонтана, Р. Стэйл. – М., 1980. – 6. – С. 259–265.
14. ГОСТ 9.502-82. Единая система защиты от коррозии и старения. Ингибиторы коррозии металлов для водных систем. Методы коррозионных испытаний. - Введ. 1984-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 26 с.
15. ГОСТ 9.907-83. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлургические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний. - Введ. 1983-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 6 с.
16. ГОСТ 9.514-99. Единая система защиты от коррозии и старения. Ингибиторы коррозии металлов для водных систем. Электрохимический метод определения защитной способности. - Введ. 2002-01-01. - М. : Изд-во стандартов, 2000. – 19 с.
17. Zou Y. Electrochemical techniques for determining corrosion rate of rusted steel in seawater / Y. Zou, J. Wang, Y. Y. Zheng // *Corrosion Science*. – 2011. – Vol. 53, № 1. – P. 208–216.
18. Лапотьшкіна Н. П. Водоподготовка и водно-химический режим тепловых сетей / Лапотьшкіна Н. П., Сазонов Р. П. – М. : Энергоиздат, 1982. – 200 с. : ил.
19. Nucleation and growth of calcium carbonate by an electrochemical scaling process / Gabrielli C., Maurin G., Poindessous G., Rosset R. // *Journal of Crystal Growth*. – 1999. – Vol. 200, № 1-2. – С. 236-250.
20. Characterization of calcareous deposits in artificial sea water by impedances techniques: 2-deposit of Mg(OH)₂ without CaCO₃ / Deslouis C., Festy D., Gil O., Maillot V., Touzain S., Tribollet B. // *Electrochimica Acta*. – 2000. – Vol. 45, № 11. – P.1837-1845.
21. Влияние природных и технологических вод на коррозию металлов / Паршутин В. В., Ревенко В. Г., Шолтоян Н. С., Чернова Г. П., Богдашкина Н. Л. // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 414-420.
22. Jianping Lin Study of corrosion material accumulated on the inner wall of steel water pipe / Jianping Lin, Mark Ellaway, Robert Adrien // *Corrosion science*. – 2001. – Vol. 43, № 11. – P. 2065-2081.