УДК 629.197.5:544.652

ВПЛИВ КОРОЗИВНОСТІ СЕРЕДОВИЩА НА ВІДНОШЕННЯ СТРУМУ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ ДО ГРАНИЧНОГО ДИФУЗІЙНОГО ДЛЯ ТРУБНОЇ СТАЛІ Х70

Л. І. НИРКОВА, С. О. ОСАДЧУК, А. В. КЛИМЕНКО, А. О. РИБАКОВ, С. Л. МЕЛЬНИЧУК, С. М. ПРОКОПЧУК

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ

Досліджено залежність відношення струму катодного захисту до граничного дифузійного для сталі Х70 у нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних поляризаційних потенціалів від –0,75 до –1,05 V (відносно хлоридсрібного електрода порівняння) в середовищах з різною корозійною активністю. Встановлено, що в діапазоні pH від 5,6 до 9,6 зі зміщенням потенціалу у бік від'ємніших значень співвідношення $j_{c.p.}/j_{O_2}$ зростає від 0,5 до 138. Виявлено, що за однакового поляризаційного захисного потенціалу на ділянці магістрального газопроводу швидкість корозії в дефекті захисного покриву сталі може не тільки знизитися, але й активізувати відновлення водню. Доцільно значення $j_{c.p.}/j_{O_2}$, вище за яке пришвидшується розклад ґрунтового електроліту та виникає імовірність наводнювання стінки труби в дефекті покриву, визначати для кожного середовища та враховувати під час проектування катодного захисту магістральних газопроводів та моніторингу в період експлуатації, щоб попередити корозійне розтріскування від напружень.

Ключові слова: *сталь Х70 трубного сортаменту, захисний поляризаційний потенціал, катодний захист, швидкість залишкової корозії, співвідношення струму катодного захисту до граничного дифузійного.*

Всі магістральні трубопроводи, незалежно від умов експлуатації, підлягають протикорозійному захисту покривами та електрохімічному (крім надземних). Їх захисний стан періодично контролюють, визначаючи низку показників, наведених у нормативних документах [1, 2–6], серед яких – мінімальні та максимальні захисні потенціали, швидкість залишкової корозії металу труби.

Встановлені в різних країнах вимоги до захисних потенціалів відрізняються. Зокрема, у нормативних документах України та країн СНД регламентують мінімальні та максимальні значення захисних потенціалів, у т.ч. без омічного складника [1–3, 7]. Стандарти EN 12954 [8] та NACE SP0169 [4], крім того, вказують на потребу ураховувати властивості ґрунтів.

Зауважили, що на розглядуваній окремій ділянці магістрального трубопроводу рекомендовані значення захисного потенціалу можуть виявитись недостатніми або надлишковими, щоб забезпечити задовільний захист. Ефективним вважають захист, коли швидкість залишкової корозії не перевищує 0,01 mm/year [1, 9]. Але, як свідчить світовий досвід, навіть якщо вищевказані показники знаходяться у межах нормованих стандартами значень, можливий розвиток корозійних процесів, в тому числі корозійного розтріскування від напруження (КРН). В дослідженнях останніх років як додатковий критерій стану електрохімічного захисту розглядають співвідношення густин струму катодного захисту і граничного дифузійного.

Ефект саморегулювання катодного захисту трубопроводів у дефектах ізоляційного покриття полягає в тому, що швидкість корозії на локальній ділянці тру-

Контактна особа: Л. І. НИРКОВА, e-mail: lnyrkova@gmail.com

бопроводу в наскрізному дефекті ізоляції і в зоні контакту оголеного металу з електролітом під відшарованою ізоляцією, що знаходиться в різних умовах доставлення кисню за встановленого режиму катодного захисту, знижується до однакових значень. У будь-якому дефекті $j_{c.p.}/j_{O_2}$ = const (де $j_{c.p.}$ – густина захисного струму; j_{O_2} – густина граничного дифузійного струму відновлення кисню). За відсутності катодного захисту швидкість корозії в дефектах ізоляції може відрізняється майже на порядок [10].

За умов, які викликають відновлення водню з ґрунтового електроліту під час експлуатації підземних трубопроводів, зокрема великого діаметра, може наводнюватися стінка. Припускають [10], що ініціювання стрес-корозійних тріщин може починатися, якщо струм катодного захисту $j_{c.p.}$ перевищує граничний дифузійний j_{O_2} більш ніж у 10 разів. Наприклад, якщо співвідношення струмів $j_{c.p.}/j_{O_2}$ знаходиться в межах від 3 до 7, швидкість корозії знижується до 0,007…0,01 mm/year без наводнювання трубної сталі (ці співвідношення отримані для трубопроводу зі сталі 09Г2С у ґрунті). Тому викликає інтерес вивчити зміну цього співвідношення струмів у середовищах різної корозивності, в яких за результатами різних дослідників виникає КРН магістральних трубопроводів.

Матеріали та методи випроб. Досліджували у розчинах: № 1 – 0,037 g/l KCl + + 0,559 $NaHCO_3$ + 0,008 $CaCl_2$ + 0,089 g/l $MgSO_4$ (pH 8,2, питомий електричний опір 12,15 Ω·m); № 2 – 2,28 g/l HCOOH + 54,4 HCOONa + 10,8 g/l KSCN (pH 5,6, питомий електричний опір 0,268 Ω·m); № 3 – 0,1 M $NaHCO_3$ + 0,1 M Na_2CO_3 (pH 9,6, питомий електричний опір 0,546 Ω·m). Розчини готували на дистильованій воді, використовуючи реактиви класифікації “ч.д.а.”. Реактиви зважували на аналітичних лабораторних терезах ВЛР-200. Випробовували при 20°C за вільного доступу кисню. Швидкість корозії визначали методом поляризаційного опору впродовж 60 min за допомогою універсального корозиметра УИСК-101. Потенціал корозії вимірювали впродовж 30 min, а потенціодинамічні криві – за триелектродною схемою зі швидкістю сканування потенціалу 0,5 mV/s. Застосовували потенціостат ПИ-50-1.1 та програматор ПР-8. Струм та потенціал реєстрували цифровим мультиметром Array3500A. Робочий електрод – зразок зі сталі X70, допоміжний – платиновий, електрод порівняння – насичений хлоридсрібний. Хімічний склад сталі X70 (wt.%): 0,095 C; 1,39 Mn; 0,255 Si; 0,005 S; 0,017 P; 0,032 Al; 0,04 Ni; 0,03 Mo; 0,004 Ti; 0,05 V; 0,027 Nb; 0,04 Cr.

За поляризаційними кривими визначали електрохімічні характеристики сталі. Результати дослідження аналізували в нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних поляризаційних потенціалів від –0,75 до –1,05 V відносно хлоридсрібного електрода порівняння (що відповідає від –0,85 до –1,15 V відносно мідносульфатного).

Результати та їх обговорення. ***Обґрунтування вибору розчинів***. Корозивність середовища, в якому пролягають трубопроводи, різна. Згідно з табл. 1 ДСТУ 4219, вона висока, якщо питомий електричний опір ґрунту менше 20 Ω·m. Тобто досліджувані середовища мають високу корозивність, де pH змінюється від 5 до 12. Випробовували в розчинах, в яких за даними різних дослідників відбувалося КРН магістральних трубопроводів: модельний ґрунтовий електроліт (МГЕ) (розчин зі слаболужним pH для дослідження стрес-корозійного розтріскування, який найближчий за хімічним складом до витяжок з ґрунту та ґрунтових вод на території України) [11]; розчин на основі мурашиної кислоти (кислий розчин для вивчення стрес-корозійного розтріскування [12]); карбонат-бікарбонатний (лужний розчин, в якому за високих pH відбувається стрес-корозійне розтріскування; перші випадки КРН зареєстровані саме в таких середовищах [14]).

Корозійні та електрохімічні властивості сталі X70 в досліджуваних розчинах. Вибрані середовища мають різну корозивність (рис. 1*a*). Швидкість су-

цільної корозії сталі у МГЕ становить ~0,096 mm/year, в розчині на основі мурашиної кислоти – ~0,148, а в карбонат-бікарбонатному – ~0,0061 mm/year. Її потенціал корозії у МГЕ та розчині на основі мурашиної кислоти відрізняється незначно і становить приблизно –0,68 і –0,67 V, відповідно, у карбонат-бікарбонатному він значно позитивніший (–0,43 V), що свідчить про схильність поверхні до пасивації, а отже, і до локальної корозії. Уповільнили зміну потенціалу у розчинах № 1 і 2 вже через 15 min, у розчині № 3 – тільки через 60 min (рис. 1). Закономірно відрізняється і анодна поведінка сталі. Найбільші струми її розчинення зафіксували у розчині на основі мурашиної кислоти (рис. 1*c*, крива *2*), найменші – у карбонат-бікарбонатному (рис. 1*c*, крива *3*).

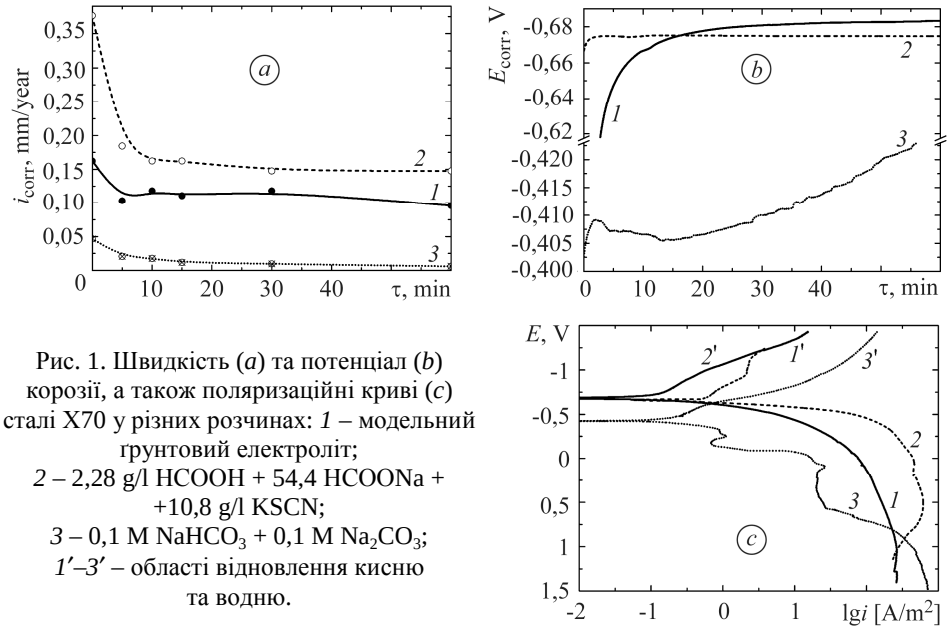

Рис. 1. Швидкість (*a*) та потенціал (*b*) корозії, а також поляризаційні криві (*c*) сталі X70 у різних розчинах: *1* – модельний ґрунтовий електроліт; *2* – 2,28 g/l HCOOH + 54,4 HCOONa + +10,8 g/l KSCN; *3* – 0,1 M $NaHCO_3$ + 0,1 M Na_2CO_3; *1′–3′* – області відновлення кисню та водню.

Fig. 1. Rate (*a*) and potential (*b*) of corrosion and polarization curves (*c*) of X70 steel in the solutions under investigation: *1* – model soil electrolyte; *2* – 2.28 g/l HCOOH + 54.4 HCOONa + + 10.8 g/l KSCN; *3* – 0.1 M $NaHCO_3$ + 0.1 M Na_2CO_3; *1′–3′* – regions of oxygen and hydrogen reduction

Анодне розчинення сталі у водних розчинах описує реакція

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}. \quad (1)$$

У розчині на основі мурашиної кислоти поверхня постійно знаходиться в активному стані, оскільки продукти корозії заліза, що утворилися на межі поділу метал–електроліт, поступово розчиняються. Цим пояснюють вищі струми розчинення (рис. 1*c*, крива *2*), ніж в інших розчинах. Деяке гальмування анодного розчинення обумовлено екрануванням поверхні накопиченими продуктами корозії у нерухомому середовищі.

У присутності бікарбонат-йонів у розчинах № 1 та 3 зі збільшенням концентрації йонів Fe^{2+} під час контакту зі середовищем на поверхні металу формується сполука $FeCO_3$:

$$Fe^{2+} + HCO_3^{-} \rightarrow FeCO_3 + H^{+}. \quad (2)$$

Шар $FeCO_3$ у розчині зі слаболужним pH пористий і не забезпечує достатній захист, тому на кривій відсутня область стійкої пасивації (рис. 1*c*, крива *1*). За вищих pH (карбонат-бікарбонатний розчин) шар $FeCO_3$ нерозчинний, що сприяє гальмуванню розчинення сталі, і на кривій видно область пасивації (рис. 1*c*, крива *3*).

Тафелевські нахили анодних поляризаційних кривих сталі Х70 (b_a) у розчинах № 1–3 становлять 0,092; 0,044 і 0,086 V, відповідно, що задовільно корелює з особливостями її анодного розчинення. Тобто зі зміщенням pH розчину в лужну область корозійна активність сталі знижується.

Швидкість залишкової корозії (згідно з ДСТУ 4219) обчислювали за швидкістю корозії та константами Тафеля:

$$i_{\text{res}} = i_{\text{corr}} \cdot 10^{\frac{E_{\text{pol}} - E_{\text{corr}}}{b_a}}, \qquad (3)$$

де i_{res} – швидкість залишкової корозії металу трубопроводу в дефекті захисного покриву; i_{corr} – швидкість корозії металу у досліджуваному середовищі; E_{pol} – захисний поляризаційний потенціал; E_{corr} – потенціал корозії; b_a – тафелевський нахил анодної поляризаційної кривої.

В умовах катодної поляризації у водному електроліті перебігають такі реакції.

За pH, близьких до нейтральних,

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2 \uparrow, \qquad (4)$$

у слабокислих – відновлення йонів гідроксонію

$$2H_3O^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O + H_2 \uparrow, \qquad (5)$$

у слаболужних – відновлення гідроксид-йонів

$$4OH^- + 4e^- \rightarrow O_2 + H_2O. \qquad (6)$$

Граничний дифузійний струм у МГЕ становить ~0,238 A/m^2, а потенціал виділення водню –0,979 V. У розчині на основі мурашиної кислоти граничний струм відновлення кисню 0,764 A/m^2, а відновлення водню, яке стає єдиним катодним процесом, відбувається за від'ємнішого, ніж –0,84 V, потенціалу. У карбонат-бікарбонатному значення граничного дифузійного струму близьке до такого у МГЕ (~0,3 A/m^2), а потенціал виділення водню значно нижчий, ніж у двох попередніх розчинах, і становить –0,620 V.

Аналіз співвідношення $j_{\text{c.p.}}/j_{O_2}$. Співвідношення струмів на сталі Х70 вивчали в нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних потенціалів (поляризаційних) від –0,75 до –1,05 V. Встановили, що для всіх досліджуваних розчинів воно більше або менше зростає з підвищенням потенціалу катодного захисту. Найбільші значення зафіксували для карбонат-бікарбонатного (рис. 2*c*).

Модельний ґрунтовий електроліт. Співвідношення $j_{\text{c.p.}}/j_{O_2}$ (рис. 2*a*, крива *1*) зростає в діапазоні потенціалів від –0,75 до –1,0 V з 0,5 до 2,4, в інтервалі від –1,0 до –1,05 V – вдвічі (від 2,4 до 4,8) та далі продовжує збільшуватися, але повільніше. Швидкість залишкової корозії набуває значень 0,01 mm/year, за яких захисний ефект вважають досягнутим, за потенціалу –0,79 V (рис. 2*a*, крива *2*) та продовжує падати за від'ємніших значень. При цьому співвідношення $j_{\text{c.p.}}/j_{O_2}$ = 0,8. З подальшим зміщенням захисного потенціалу у катодну область до від'ємніших значень швидкість залишкової корозії змінюється несуттєво. Але починається розкладання водного електроліту з виділенням водню за реакцією (4), яке тим інтенсивніше, що більше співвідношення струмів. Тобто для цього середовища можна вважати, що оптимальний захист буде досягнуто при $j_{\text{c.p.}}/j_{O_2} \cong 0{,}8$, і подальше збільшення захисного потенціалу неефективне.

Розчин на основі мурашиної кислоти. Тут співвідношення струмів різко зростає від 1 до 2,8 за потенціалів від –0,75 до –0,95 V та повільно збільшується з наближенням до захисного максимального потенціалу, досягаючи значення 2,9 (рис. 2*b*, крива *1*). Граничний дифузійний струм зафіксували за потенціалу –0,75 V. Швидкість залишкової корозії у всьому діапазоні захисних потенціалів, починаючи від –0,75 V, становить менше 0,01 mm/year (рис. 2*b*, крива *2*), а співвідно-

шення струмів дорівнює 1,0. За від'ємніших, ніж –0,796 V, потенціалів, коли $j_{c.p.}/j_{O_2} \cong 1{,}2$, на поверхні сталі починає виділятися водень, і за подальшої катодної поляризації водний електроліт розкладається за реакцією (5). Тобто для середовища з такою корозивністю ефективний захист досягається, якщо $j_{c.p.}/j_{O_2} \cong$ $\cong 1{,}0$, тому збільшувати захисний потенціал недоцільно.

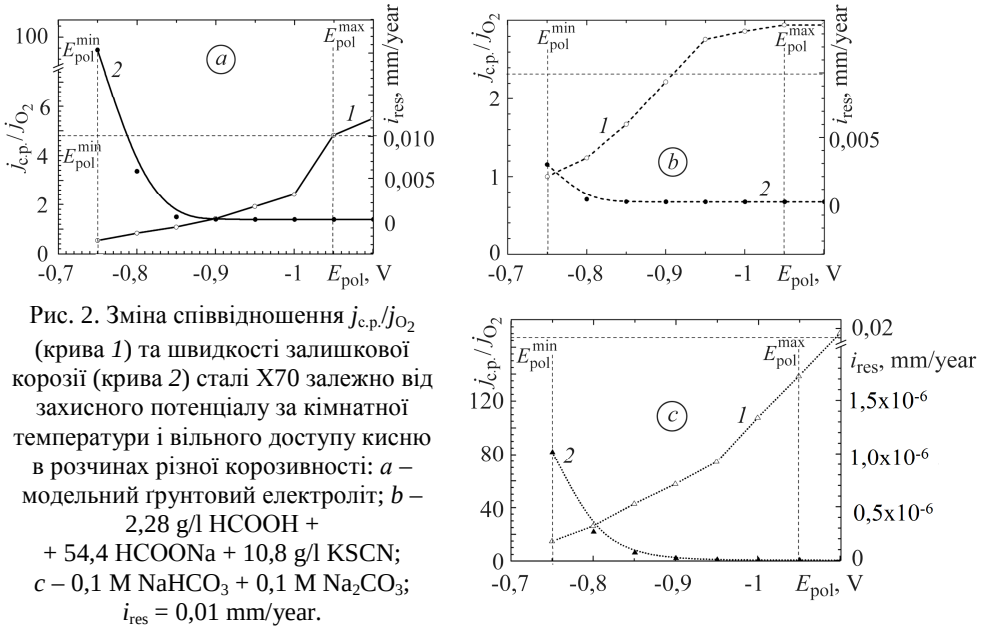

Рис. 2. Зміна співвідношення $j_{c.p.}/j_{O_2}$ (крива *1*) та швидкості залишкової корозії (крива *2*) сталі X70 залежно від захисного потенціалу за кімнатної температури і вільного доступу кисню в розчинах різної корозивності: *a* – модельний ґрунтовий електроліт; *b* – 2,28 g/l HCOOH + + 54,4 HCOONa + 10,8 g/l KSCN; *c* – 0,1 M $NaHCO_3$ + 0,1 M Na_2CO_3; i_{res} = 0,01 mm/year.

Fig. 2. Change of $j_{c.p.}/j_{O_2}$ ratio (curve *1*) and residual corrosion rate (curve *2*) of X70 steel, depending on the protective potential at room temperature under conditions of free access of oxygen in the solutions of different corrosivity: *a* – model soil electrolyte; *b* – 2.28 g/l HCOOH + + 54.4 HCOONa + 10.8 g/l KSCN; *c* – 0.1 M $NaHCO_3$ + 0.1 M Na_2CO_3; i_{res} = 0.01 mm/year.

Карбонат-бікарбонатний розчин. Тут співвідношення струмів збільшується досить різко – від 14,7 до 138,5 у діапазоні потенціалів від –0,75 до –1,05 V (рис. 2*c*, крива *1*). Швидкість залишкової корозії у всьому діапазоні захисних потенціалів на чотири порядки менша і становить 0,01 mm/year (рис. 2*c*, крива *2*). За мінімального захисного потенціалу значення $j_{c.p.}/j_{O_2}$ становить 14,7. Граничний дифузійний струм фіксували за потенціалу ~ –0,620 V, тому цілком закономірно, що вже за мінімального значення захисного потенціалу –0,75 V на поверхні сталі виникають сприятливі умови для відновлення водню. Ефективним стимулятором наводнювання є гідрокарбонат-йони, які також здатні відновлюватися до карбонат-йонів, зумовлюють утворення адсорбованих атомів водню [10]. Можна припустити, що для середовищ, в яких значення потенціалу корозії на 300…350 mV позитивніші, ніж мінімального захисного, та швидкість залишкової корозії за цього потенціалу нижча за технічно достатнє значення, для задовільного захисту достатньо змістити потенціал на 100 mV до від'ємніших, ніж потенціал корозії, значень, що узгоджується з вимогами зарубіжних стандартів [4, 9]. Тобто для середовищ, в яких сталь схильна до пасивації, захисний ефективний захист досягнуто за потенціалів, менших за абсолютним значенням, ніж нормований мінімальний захисний, коли $j_{c.p.}/j_{O_2} \cong 14{,}7$. Отже, на співвідношення струмів впливають питомий електричний опір середовища, pH, концентрація кисню та температура (рис. 3).

Навіть, якщо питомий електричний опір середовища знаходиться в однаковому діапазоні (менше 20 Ω·m), як у цьому дослідженні, співвідношення $j_{c.p.}/j_{O_2}$ може суттєво відрізнятися для різних pH. Наприклад, на ділянці, де контактують

середовища з pH 9,6 та 8,2 за мінімального захисного потенціалу утворюються області ефективного та недостатньо ефективного катодного захисту. Це призводить до розчинення металу на ділянці, де $j_{c.p.}/j_{O_2} \cong 0{,}5$, і пришвидшеного розкладу водного електроліту з виділенням водню – на іншій, де $j_{c.p.}/j_{O_2} \cong 14{,}7$. Обидва випадки свідчать про недостатню ефективність захисту.

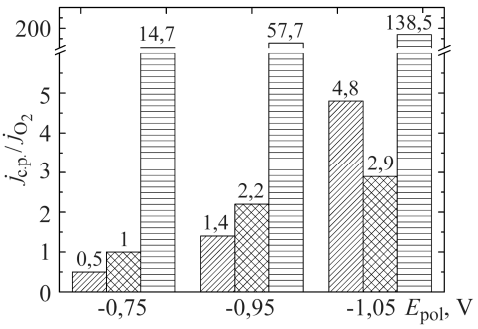

Рис. 3. Зміна співвідношення $j_{c.p.}/j_{O_2}$ сталі X70 у нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних потенціалів за кімнатної температури в умовах вільного доступу кисню в розчинах різної корозивності: ▨ – модельний ґрунтовий електроліт; ▩ – 2,28 g/l HCOOH+54,4 HCOONa + + 10,8 g/l KSCN; ▤ – 0,1 M $NaHCO_3$ + 0,1 M Na_2CO_3.

Fig. 3. Change of $j_{c.p.}/j_{O_2}$ ratio of X70 steel in the range of protective potentials, normalized by the State Standard of Ukraine 4219, at room temperature under conditions of free access of oxygen in the solutions of different corrosivity: ▨ – model soil electrolyte; ▩ – 2.28 g/l HCOOH + 54.4 HCOONa + 10.8 g/l KSCN; ▤ – 0.1 M $NaHCO_3$ + 0.1 M Na_2CO_3.

За максимального захисного потенціалу –1,05 V, коли враховують швидкість залишкової корозії, в середовищах з pH 9,6 та 8,2 досягнуто захисний ефект, співвідношення $j_{c.p.}/j_{O_2} = \cong 4{,}8$ та $\cong 138{,}5$, відповідно, тобто відрізняється досить суттєво. Це свідчить про зменшення граничного струму відновлення кисню в середовищі, що призводить до початку виділення водню вже за нижчих потенціалів катодного захисту, ніж мінімальний захисний. За отриманими результатами, не вдається встановити єдине порогове значення співвідношення струмів $j_{c.p.}/j_{O_2}$, яке свідчитиме про ефективність катодного захисту. Імовірно, граничне значення, вище за яке пришвидшується розклад ґрунтового електроліту та виникає імовірність наводнювання стінки в дефекті покриття, доцільно визначати для кожного середовища та враховувати під час проектування катодного захисту магістральних газопроводів та їх моніторингу в період експлуатації, щоб запобігти КРН.

ВИСНОВКИ

Досліджено вплив корозивності середовища на співвідношення струму катодного захисту до граничного дифузійного $j_{c.p.}/j_{O_2}$ на сталі X70 в нормованому ДСТУ 4219 діапазоні захисних поляризаційних потенціалів від –0,75 до –1,05 V (відносно хлоридсрібного електрода порівняння). Це співвідношення розглянуто як додатковий критерій оцінювання стану катодного захисту, яке зростає зі збільшенням лужності розчину: у розчині з pH 8,2 – від 0,54 до 4,8, з pH 5,6 – від 1 до 2,9, з pH 9,6 – від 15 до 138,5. Оскільки трубопровід може пролягати в ґрунтах з різною корозійною активністю, то однаковий поляризаційний захисний потенціал на ділянці сприяє не тільки гальмуванню корозії сталі в дефекті захисного покриву, але й пришвидшує відновлення водню. Припущено, що граничне значення цього співвідношення, вище за яке активізується розклад ґрунтового електроліту та виникає імовірність наводнювання стінки в дефекті покриву, доцільно визначати для кожного середовища та враховувати під час проектування катодного захисту магістральних газопроводів та моніторингу в період експлуатації, щоб запобігти КРН.

РЕЗЮМЕ. Исследована зависимость соотношения тока катодной защиты к предельному диффузионному для стали X70 в нормируемом ДСТУ 4219 диапазоне защитных поляризационных потенциалов от –0,75 до –1,05 V (относительно хлорсеребряного электрода сравнения) в средах с разной коррозионной активностью. В диапазоне pH 5,6…9,6 при смещении потенциала к более отрицательным значениям соотношение $j_{c.p.}/j_{O_2}$ возрастает

от 0,5 до 138. Выявлено, что одинаковый поляризационный защитный потенциал на участке магистрального газопровода может способствовать не только торможению коррозии стали в дефекте защитного покрытия, но и ускорению восстановления водорода. Целесообразно значение соотношения $j_{c.p.}/j_{O_2}$, выше которого активизируется разложение грунтового электролита и возникает вероятность наводороживания стенки трубы в дефекте покрытия, определять для каждой среды и учитывать при проектировании катодной защиты магистральных газопроводов и мониторинге в период эксплуатации с целью предупреждения инициирования коррозионного растрескивания под напряжением.

Ключевые слова: *сталь Х70 трубного сортамента, защитный поляризаионный потенциал, катодная защита, скорость остаточной коррозии, отношение тока катодной защиты к предельному диффузионному.*

SUMMARY. The dependence of the ratio of the cathodic protection current and the limiting diffusion current $j_{c.p.}/j_{O_2}$ on X70 steel in the range of protective polarization potentials, normalized by the State Standard of Ukraine 4219, from –0.75 to –1.05 V (relative to chlorine-silver reference electrode) in the environments with different corrosion activity is investigated. In the pH range from 5.6 to 9.6 under potential shifting to the more negative values, the ratio $j_{c.p.}/j_{O_2}$ increases from 0.5 to 138. It is found that the same polarization protective potential on the section of the main gas pipeline could not only promote the retardation of steel corrosion in the protective coating defect, but also increase hydrogen reduction. It is worth determining the ratio $j_{c.p.}/j_{O_2}$, above which decomposition of the soil electrolyte accelerates and the probability of hydrogenation of the pipe wall in the coating defect appears, for each environment and to take it into account when designing cathode protection of the main gas pipelines and monitoring during operation to prevent initiation of stress corrosion cracking.

Keywords: *X70 steel of pipe assortment, protective polarizational potential, cathodic protection, residual corrosion rate, ratio of cathodic protection current and limit diffusion current.*

1. *ДСТУ 4219-2003*. Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії. – К.: Держспоживстандарт України, 2003. – 68 с.
2. *ГОСТ 9.602-2005*. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Стандартинформ, 2006. – 60 с.
3. *ГОСТ 9.602-2016*. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Стандартинформ, 2016. – 94 с.
4. *NACE SP0169-2007* (formerly RP0169). Parts incorporated in pipeline safety regulations Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems. – Huston, 2007. – 32 p.
5. *NACE RP0104-2004*. The Use of Coupons for Cathodic Protection Monitoring Applications. – Huston, 2004. – 32 p.
6. *NACE RP0502-2002*. Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology. – Huston, 2002. – 58 p.
7. *ГОСТ Р 51164-98*. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Госстандарт России, 1998. – 42 с.
8. *BS EN 12954:2001*. Cathodic protection of buried or immersed metallic structures – General principles and application for pipeline. – London, 2001. – 34 p.
9. *ДСТУ EN 12954:2016*. Захист катодний підземних та підводних металевих споруд. Основні принципи та використання для трубопроводів (EN 12954:2001, IDT).
10. *Хижняков В. И.* Развитие научных основ, разработка и реализация новых критериев эффективности электрохимической защиты трубопроводов от коррозии: Дисс. … докт. техн. наук, 2010.
11. *Патент РФ № 2082154*. МПК G 01 N17/00. Состав для проведения испытаний на стойкость трубных сталей к коррозионному растрескиванию под напряженим / А. П. Лубенский, С. А. Лубенский, Н. А. Чебурахтин, В. Г. Антонов. – Опубл. 20.06.1997.
12. *Parkins R. N.* Intergranular stress-corrosion cracking of high-pipeline in contact with pH solution // Corr. – 1987. – **43**, № 5. – P. 130.
13. *Корозійне* розтріскування трубної сталі Х70 за потенціалу, наближеного до максимального захисного / Л. І. Ниркова, С. Л. Мельничук, С. О. Осадчук, А. О. Рибаков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 4. – С. 110–115.
(*Corrosion* cracking of Kh70 pipe steel for potentials close to the maximum protective potential / L. I. Nyrkova, S. L. Mel'nychuk, S. O. Osadchuk, A. O. Rybakov // Materials Science. – 2019. – **54**, № 4. – С. 567–572.)

Одержано 03.09.2019