

УДК 620.191.33

## ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО НАВОДНЮВАННЯ–ЗНЕВОДНЮВАННЯ НА ЗДАТНІСТЬ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ АБСОРБУВАТИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИЙ ВОДЕНЬ

I. М. ДМИТРАХ, А. М. СИРОТЮК, Р. Л. ЛЕЩАК

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів*

Встановлено, що попереднє циклічне наводнювання–зневоднювання феритно-перлітної трубної сталі суттєво впливає на її здатність поглинати електрохімічний водень, кількість якого зростає зі збільшенням таких циклів. Розрахована концентрація водню, адсорбованого приповерхневими шарами металу та абсорбованого об'ємом металу, а також сумарна у металі залежно від кількості циклів наводнювання–зневоднювання. Виявлено, що для розглянутих випадків попереднє наводнювання–зневоднювання збільшує здатність сталі поглинати водень у 1,2–2 рази.

**Ключові слова:** *низьколеговані сталі, електрохімічне наводнювання, наводнювання–зневоднювання металу, концентрація водню.*

It is established that the preliminary cyclic hydrogen charging–discharging of ferritic-pearlitic pipeline steel significantly affects its further ability to absorb electrochemical hydrogen and the amount of absorbed hydrogen increases with the increase of such cycles. The concentration of hydrogen adsorbed by the metal sub-surface layers, the concentration of hydrogen absorbed by the metal bulk and its total concentration in the metal are calculated depending on the number of cycles of hydrogen charging–discharging. It is shown that for the considered cases the preliminary hydrogen charging–discharging increases the further ability of steel to absorb hydrogen in 1.2–2 times.

**Keywords:** *low-alloyed steel, electrochemical hydrogenation, hydrogen charging–discharging of metal, hydrogen concentration.*

**Вступ.** Газотранспортні мережі (і магістральні, і вторинні) – критичний компонент промислової та транспортної інфраструктури України. Тому важливо забезпечити їх надійну та безаварійну роботу, враховуючи безперервний режим роботи газопроводів, їх значну протяжність, високий тиск газу та складні природно-кліматичні умови [1].

Для підземних трубопроводів одним із негативних чинників, який проявляється під час тривалої експлуатації, є пошкодження та відшарування захисних покриттів під дією зовнішнього середовища. Через це на поверхні труби утворюються корозійні та корозійно-механічні дефекти, створюючи ризик корозійного розтріскування трубопроводу [2, 3], яке тут є результатом сумісної дії на метал труби механічних напружень, зумовлених тиском транспортованого продукту, та корозивного ґрунтового середовища. У цьому випадку виникає ситуація, коли система вільно кородує, що призводить до анодного електрохімічного розчинення металу труби, а також виділення водню на її поверхні через спряжену катодну реакцію [4], згідно з якою в знекисненому, близькому до нейтрального, водному середовищі водень на поверхні сталі утворюється внаслідок електрохімічного розкладу молекули води [5, 6].

Встановлено [1, 7–10], що водневий чинник домінує під час корозійного розтріскування низьколегованих феритно-перлітних трубних сталей. Його вплив

також може суттєво посилюватись за неналежної роботи системи катодного захисту трубопроводу [11]. Наприклад, експериментально доведено [12], що за підтримування захисного потенціалу на рівні  $-1,45$  V швидше (майже втричі) відшаровується тривало експлуатоване захисне стрічкове покриття порівняно з новим.

Таким чином, особливо важливо вивчити електрохімічне наводнювання низьколегованих сталей під час експлуатації газопроводів, щоб забезпечити їх надійну та безперебійну роботу. Для цього необхідні спеціальні фізико-хімічні дослідження в умовах, наближених до реальних.

Нижче на прикладі типової феритно-перлітної трубної сталі вивчено електрохімічне наводнювання трубопроводу з пошкодженим чи відшарованим захисним покриттям. Вважали, що частина первинно абсорбованого металом труби водню може з часом десорбуватись, а далі ця ж ділянка здатна повторно наводнюватись. Тобто під час експлуатації трубопроводу є певна циклічність його наводнювання–зневоднювання. Тому мета цього дослідження – встановити її вплив на подальшу здатність металу трубопроводу абсорбувати електрохімічний водень, тобто оцінити зміну концентрації дифузійно-рухливого водню у сталі залежно від кількості циклів її попереднього наводнювання–зневоднювання.

**Методика досліджень.** Випробовували типову феритно-перлітну трубну сталь (0,17...0,24 mass% C; 0,17...0,37 Si; 0,35...0,65 Mn; 0,04 S), яка володіє такими механічними характеристиками:  $\sigma_B = 440...540$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 260$  МПа,  $\delta = 26\%$ ,  $HB = 156$  (рис. 1).

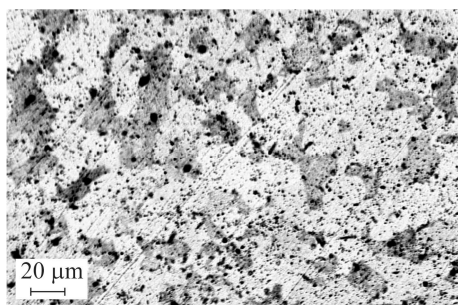


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Мікроструктура сталі.

Fig. 1. Microstructure of steel.

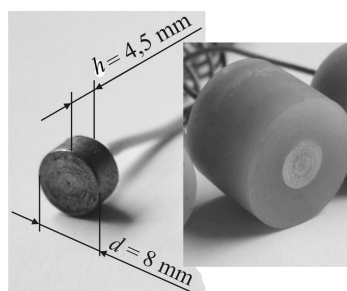


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Зразок для дослідження електрохімічного наводнювання–зневоднювання трубної сталі.

Fig. 2. Specimen for study of electrochemical hydrogen charging–discharging of pipeline steel.

Для дослідження поверхневого електрохімічного наводнювання сталі використали спеціально підготовлені циліндричні зразки [13] діаметром  $d = 8$  mm і висотою  $h = 4,5$  mm (рис. 2). Застосовували спеціальний водний розчин NS4 (0,122 g/l K; 0,483 NaHCO<sub>3</sub>; 0,137 CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O; 0,131 MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) [14], що імітує підземні води в умовах нейтральних ґрунтів (pH 6,7).

Оскільки досягти стабільних (усталених) умов наводнювання сталі в умовах вільної корозії важко, використали таку процедуру [14]. Електрохімічно наводнювали в гальваностатичному режимі за густини струму катодної поляризації, близької ( $i_{\text{cath}} = 2$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) до густини струму вільної корозії. Так забезпечили низьку інтенсивність наводнювання, а отже, максимально наблизили модельований процес до реальних умов наводнювання під час експлуатації трубопроводів. Окрім цього, для порівняння, досліджували за густини струму наводнювання  $i_{\text{cath}} = 200$   $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Зразки заздалегідь наводнювали впродовж фіксованого часу  $\tau = 1$  h, а потім повністю зневоднювали. Для кожної серії випробувань цю процедуру повторювали, щоб отримати зразки з різною кількістю циклів цього процесу  $N_H$ , тобто  $N_H = 1, 2, 3$ .

Загальну кількість утвореного на поверхні водню оцінювали за співвідношенням

$$Q_{H(ev)} = i_{cath} \cdot S \cdot \tau, \quad (1)$$

де  $i_{cath}$  – густина струму наводнювання;  $S$  – площа поверхні зразка;  $\tau$  – час наводнювання.

Концентрацію водню в металі визначали за модифікованим методом [14, 15], який ґрунтується на його впливі на реакцію окиснення сталі під час анодної поляризації.

Наводнений метал окиснювали в 0,2 М розчині NaOH (рН 12,4) за сталого потенціалу анодної поляризації  $E_{anodic} = +168$  mV (SCE – насичений каломельний електрод) упродовж визначеного проміжку часу  $\tau_{dis}$ . Загальну кількість поглинутого металом водню визначали так:

$$Q_H = \int_0^{\tau_{dis}} [I_H(\tau) - I_{ref}(\tau)] d\tau. \quad (2)$$

Тут  $I_H(\tau)$ ,  $I_{ref}(\tau)$  – експериментальні залежності анодного поляризаційного струму наводненого і ненаводненого зразків.

Концентрацію водню в металі розраховували за формулою

$$C_H = Q_H / (z \cdot F \cdot v), \quad (3)$$

де  $z = 1$  – кількість електронів, які беруть участь у електрохімічній реакції;  $F = 9,65 \cdot 10^4$  C/mol – стала Фарадея;  $v$  – ефективний об'єм наводненого металу [cm<sup>3</sup>]. У цьому випадку концентрація  $C_H$  матиме розмірність [mol/cm<sup>3</sup>]. Надалі ці значення перераховували у загальноприйнятій одиниці [ppm].

Загалом наводнювання сталей у заданих умовах катодної поляризації характеризували такими параметрами: концентрацією водню у металі  $C_H$ , загальною кількістю утвореного  $Q_{H(ev)}$  та поглинутого  $Q_{H(sum)}$  металом водню, а також коефіцієнтом ефективності його проникнення в метал  $k = Q_{H(sum)} / Q_{H(ev)}$ .

У всіх дослідженнях використовували комплекс устаткування [16], який базується на динамічній електрохімічній лабораторії VoltaLab40 виробництва Radiometer Analytical SAS (Франція).

**Результати та їх обговорення.** Електрохімічне наводнювання сталі розглядали як двостадійний процес – як початкову адсорбцію приповерхневими шарами металу і подальшу абсорбцію водню його об'ємом. При цьому зміну електродного потенціалу поверхні зразка  $E_s$  під час наводнювання вважали опосередкованою, що відтворює процес формування поверхневої концентрації атомарного водню.

Встановили, що для всіх розглянутих випадків потенціал  $E_s$  зміщується в катодну область з часом наводнювання  $\tau$ , що свідчить про суттєву активацію поверхні металу (рис. 3). Однак існує принципова відмінність хронограм електродного потенціалу  $E_s = f(\tau)$  залежно від кількості циклів наводнювання–зневоднювання  $N_H$  за різної густини струму електрохімічного наводнювання. Зокрема, при  $i_{cath} = 2$   $\mu$ A/cm<sup>2</sup> зі зростанням параметра  $N_H$  криві зміщуються в область від'ємніших значень  $E_s$  (рис. 3a), а при  $i_{cath} = 200$   $\mu$ A/cm<sup>2</sup> – навпаки (рис. 3b). Це можна пояснити різною інтенсивністю осадження атомарного водню на поверхні зразка і його подальшою адсорбцією приповерхневими шарами металу. За низького рівня наводнювання ( $i_{cath} = 2$   $\mu$ A/cm<sup>2</sup>) практично весь водень безперешкодно осаджується на поверхні і адсорбується, про що свідчить зміщення потенціалу  $E_s$

в катодну область. За високого ( $i_{\text{cath}} = 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) – його кількість на поверхні зразка суттєво зростає і він не встигає поглинатись матеріалом, утворюючи своєрідний шар.

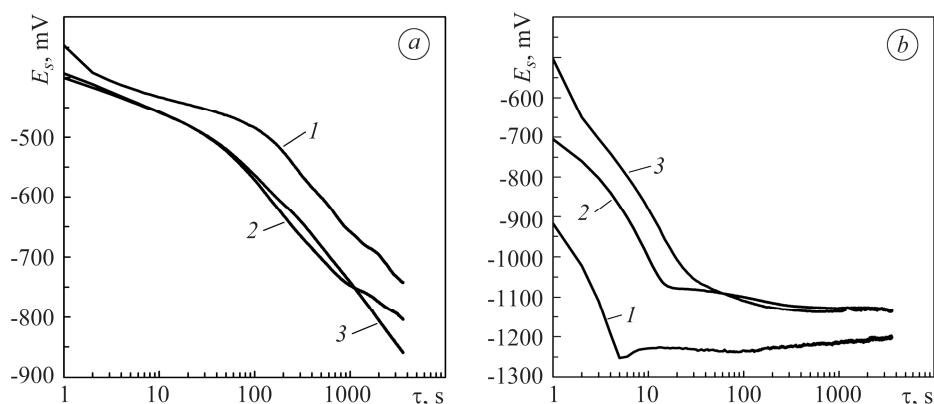


Рис. 3. Хронограми електродного потенціалу поверхні зразків  $E_s$  залежно від кількості циклів їх наводнювання–зневоднювання  $N_H$  за катодної поляризації у гальваностатичному режимі при  $i_{\text{cath}} = 2$  (а) та  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (б): 1 –  $N_H = 1$ ; 2 – 2; 3 – 3.

Fig. 3. Chronograms of the surface electrode potential of specimens  $E_s$  depending on the number of cycles of hydrogen charging–discharging  $N_H$  under cathodic polarization in the galvanostatic mode for  $i_{\text{cath}} = 2$  (a) and  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (b): 1 –  $N_H = 1$ ; 2 – 2; 3 – 3.

Важливо зауважити, що одержані результати вказують на різну електрохімічну поведінку сталі залежно від кількості циклів  $N_H$  її попереднього наводнювання–зневоднювання. Зокрема, про це свідчать кінцеві значення електродного потенціалу  $E_{sf}$  після наводнювання зразків за різної густини катодного струму  $i_{\text{cath}}$  (рис. 4).

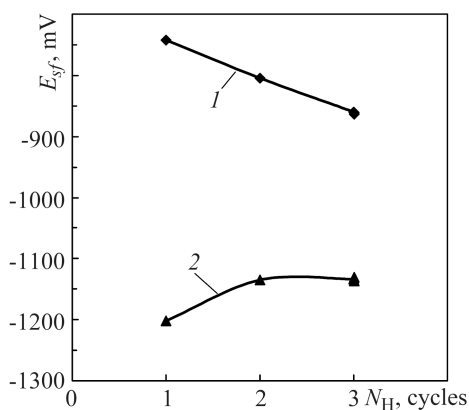


Рис. 4. Кінцеві значення електродного потенціалу поверхні зразків  $E_{sf}$  залежно від кількості циклів їх наводнювання–зневоднювання  $N_H$  за катодної поляризації у гальваностатичному режимі:  
1 –  $i_{\text{cath}} = 2$ ; 2 –  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Fig. 4. Final values of the surface electrode potential of the specimens  $E_{sf}$  depending on the number of cycles of hydrogen charging–discharging  $N_H$  under cathodic polarization in the galvanostatic mode:  
1 –  $i_{\text{cath}} = 2$ ; 2 –  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Під час електрохімічної десорбції водню зі зразків, які заздалегідь піддавали різній кількості циклів наводнювання–зневоднювання  $N_H$  за катодної поляризації при  $i_{\text{cath}} = 2$  та  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , виявили таке (рис. 5). По-перше, кількість десорбованого водню, яку оцінювали за хронограмами анодного струму  $I_H(\tau)$ , зростає зі збільшенням параметра  $N_H$ . Очевидно, що для зразків, які наводнювали при  $i_{\text{cath}} = 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , кількість десорбованого водню буде меншою (рис. 5а), ніж для наводнених при  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (рис. 5б). Проте з аналізу цих випадків випливає важливий висновок: під час попереднього наводнювання–зневоднювання збільшується здатність сталі поглинати водень, яка посилюється з ростом кількості циклів  $N_H$ .

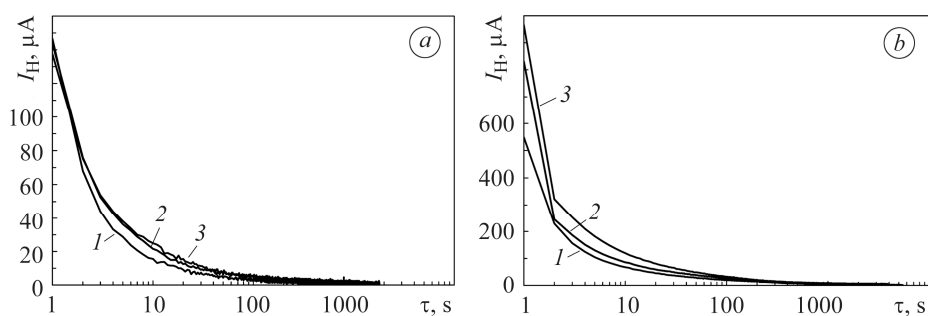


Рис. 5. Хронограми анодного струму  $I_H(\tau)$  під час електрохімічної десорбції водню зі зразків після різної кількості циклів наводнювання–зневоднювання  $N_H$  за катодної поляризації у гальваностатичному режимі при  $i_{\text{cath}} = 2$  (a) та  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (b): 1 –  $N_H = 1$ ; 2 – 2; 3 – 3.

Fig. 5. Chronograms of the anodic current  $I_H(\tau)$  during electrochemical desorption of hydrogen from specimens after different number of hydrogen charging–discharging cycles  $N_H$  under cathodic polarization in the galvanostatic mode for  $i_{\text{cath}} = 2$  (a) and  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (b): 1 –  $N_H = 1$ ; 2 – 2; 3 – 3.

Хронограми анодного струму  $I_H(\tau)$  під час електрохімічної десорбції водню зі зразків також містять інформацію про попереднє наводнювання металу. Для обох випадків на початкових ділянках цих кривих упродовж першої хвилини десорбції водню ( $\tau = 0 \dots 60$  s) зафіксували (рис. 6) плавне зменшення величини  $I_H$  до деякого часу  $\tau^*$ , який є різним для зразків з різною кількістю циклів  $N_H$  (табл. 1). Після  $\tau \geq \tau^*$ , спостерігали осциляції на кривих  $I_H(\tau)$ , що свідчить про утруднення десорбції водню. Такий перебіг зневоднювання дає підстави стверджувати, що в діапазоні  $0 \leq \tau \leq \tau^*$ , тобто до виникнення осциляцій, виділяється саме водень, адсорбований приповерхневими шарами металу, а далі вже десорбується абсорбований його об'ємом.

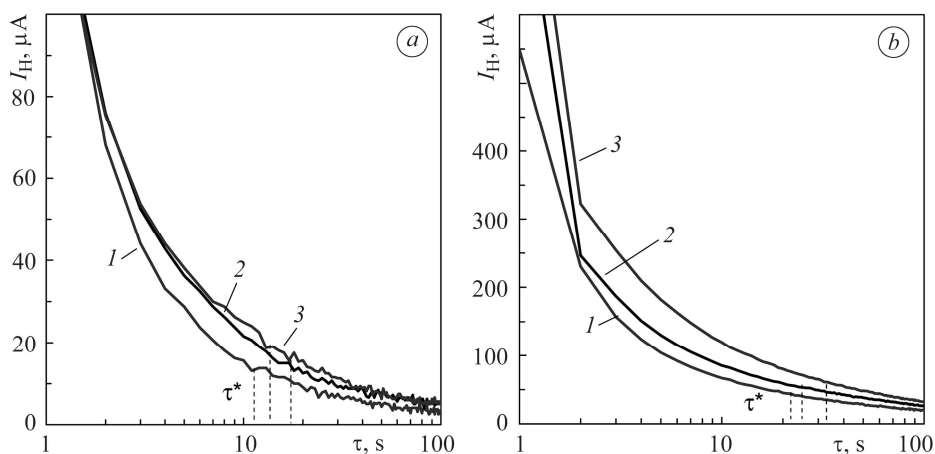


Рис. 6. Початкові ділянки хронограм анодного струму  $I_H(\tau)$  під час електрохімічної десорбції водню зі зразків після різної кількості циклів наводнювання–зневоднювання  $N_H$  за катодної поляризації у гальваностатичному режимі при  $i_{\text{cath}} = 2$  (a) та  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (b): 1 –  $N_H = 1$ ; 2 – 2; 3 – 3.

Fig. 6. Initial sections of the anodic current chronograms  $I_H(\tau)$  during electrochemical desorption of hydrogen from specimens after different number of hydrogen charging–discharging cycles  $N_H$  under cathodic polarization in the galvanostatic mode for  $i_{\text{cath}} = 2$  (a) and  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (b): 1 –  $N_H = 1$ ; 2 – 2; 3 – 3.

**Таблиця 1.** Значення параметра  $\tau^*$  для зразків після різної кількості циклів  $N_H$  наводнювання–зневоднювання

$N_H$	1	2	3
$\tau^*$ , s, при $i_{\text{cath}} = 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	11	18	13
$\tau^*$ , s, при $i_{\text{cath}} = 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$	23	26	32

кількість водню ( $Q_{H(\text{ev})}$ ) на поверхні зразків (табл. 2).

За залежністю (3), враховуючи дані табл. 2, диференціально оцінили концентрації водню у сталі  $C_{H(\text{surf})}$ ,  $C_{H(\text{abs})}$  та  $C_{H(\text{sum})}$  після різної кількості циклів  $N_H$  попереднього наводнювання–зневоднювання (рис. 7). Виявили, що під час цього процесу збільшується здатність сталі поглинати водень. Зі зростанням кількості циклів  $N_H$  для обох розглянутих умов наводнювання у гальваностатичному режимі при  $i_{\text{cath}} = 2$  та  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  підвищується як концентрація водню, адсорбованого приповерхневими шарами металу  $Q_{H(\text{surf})}$  (рис. 7a), так і адсорбованого його об'ємом  $Q_{H(\text{abs})}$  (рис. 7b), а отже, зростає загальна його кількість  $Q_{H(\text{sum})}$  (рис. 7c). Особливо така тенденція відчутна за густини струму наводнювання  $i_{\text{cath}} = 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (рис. 7, криві 2).

**Таблиця 2.** Основні характеристики наводнювання сталі залежно від параметрів  $i_{\text{cath}}$  та  $N_H$

$N_H$	$Q_{H(\text{ev})}$	$Q_{H(\text{surf})}$	$Q_{H(\text{abs})}$	$Q_{H(\text{sum})}$
	μC			
$i_{\text{cath}} = 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$				
1	3600	428	1548	1976
2	3600	616	2655	3271
3	3600	558	2821	3379
$i_{\text{cath}} = 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$				
1	360000	2216	14710	16926
2	360000	3055	17435	20491
3	360000	4404	29388	33793

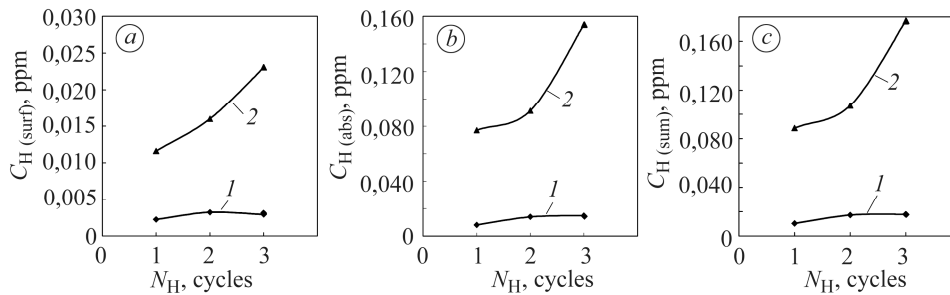


Рис. 7. Диференціальна оцінка концентрації водню  $C_{H(\text{surf})}$  (a),  $C_{H(\text{abs})}$  (b) та  $C_{H(\text{sum})}$  (c) у сталі після різної кількості циклів наводнювання–зневоднювання  $N_H$ : 1 –  $i_{\text{cath}} = 2$ ; 2 –  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

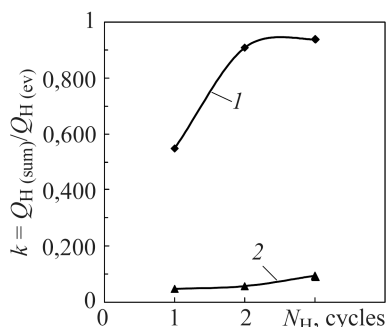
Fig. 7. Differential estimate of hydrogen concentration  $C_{H(\text{surf})}$  (a),  $C_{H(\text{abs})}$  (b) and  $C_{H(\text{sum})}$  (c) in steel after different number of hydrogen charging–discharging cycles  $N_H$ : 1 –  $i_{\text{cath}} = 2$ ; 2 –  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Слід зазначити, що зі зростанням значення  $N_H$  збільшується також сумарна кількість поглинутого металом водню  $Q_{H(\text{sum})}$  проти кількості утвореного внаслідок електрохімічного наводнювання  $Q_{H(\text{ev})}$  (рис. 8). При цьому особливо високими є значення коефіцієнта ефективності його поглинання  $k = Q_{H(\text{sum})} / Q_{H(\text{ev})}$  при  $i_{\text{cath}} = 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (рис. 8, крива 1). Це пояснюють тим, що за низького рівня наводнювання практично весь водень безперешкодно осаджується на поверхні зразка і далі поглинається металом. За високого ( $i_{\text{cath}} = 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) значення коефіцієнта  $k$  суттєво нижчі (рис. 8, крива 2) через виникнення на поверхні зразка значної

кількості водню, який не встигає поглинатись матеріалом, тому молізується і виходить в атмосферу.

Рис. 8. Оцінка ефективності поглинання водню сталлю після різної кількості циклів наводнювання–зневоднювання  $N_H$ :  
 $I - i_{\text{cath}} = 2; 2 - 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Fig. 8. Evaluation of the efficiency of hydrogen absorption by steel after different number of hydrogen charging–discharging cycles  $N_H$ :  
 $I - i_{\text{cath}} = 2; 2 - 200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .



Вплив циклічності наводнювання–зневоднювання на подальшу здатність сталі поглинати електрохімічний водень можна оцінити за співвідношенням

$$\beta = C_{H(\text{sum})}^{N_H=i} / C_{H(\text{sum})}^{N_H=1}, \quad (4)$$

де  $C_{H(\text{sum})}^{N_H=1}$  та  $C_{H(\text{sum})}^{N_H=i}$  – сумарна концентрація водню в матеріалі після першого наводнювання та  $i$ -го циклу наводнювання–зневоднювання.

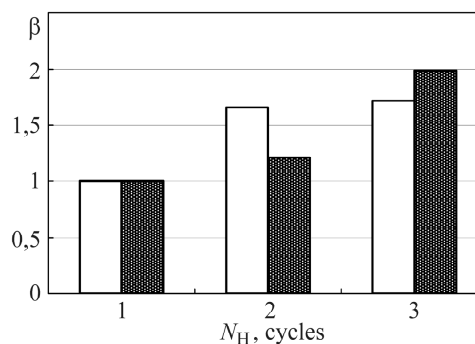
Виявили (рис. 9), що для обох випадків ( $i_{\text{cath}} = 2$  та  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) внаслідок наводнювання–зневоднювання у 1,2–2 рази збільшується здатність сталі поглинати водень залежно від значення  $N_H$ .

Підґрунтям для пояснення одержаних результатів може слугувати праця [17], де встановили, що навіть за короткочасної присутності дифузійно рухливого водню у низьколегованих сталях виникають незворотні зміни структури, зокрема, відчутно зростає дефектність, яка, очевидно, і є причиною збільшення подальшої здатності сталі поглинати водень.

Рис. 9. Залежність коефіцієнта  $\beta$  від кількості циклів наводнювання–зневоднювання  $N_H$ :

□ –  $i_{\text{cath}} = 2$ ; ■ –  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Fig. 9. Dependence of coefficient  $\beta$  on the number of hydrogen charging–discharging cycles  $N_H$ :  
□ –  $i_{\text{cath}} = 2$ ; ■ –  $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .



## ВИСНОВКИ

Встановлено, що попереднє циклічне наводнювання–зневоднювання феритно-перлітної трубної сталі суттєво впливає на її подальшу здатність поглинати електрохімічний водень, кількість якого підвищується зі збільшенням кількості циклів процесу  $N_H$ . Для цих умов диференційовано оцінено наводнювання сталі: розраховано концентрацію водню, адсорбованого приповерхневими шарами металу  $C_{H(\text{surf})}$  та абсорбованого його об'ємом  $C_{H(\text{abs})}$ , а також сумарну у металі  $C_{H(\text{sum})}$  залежно від параметра  $N_H$ . Встановлено, що зі зростанням значень  $N_H$  також підвищується кількість водню  $Q_{H(\text{sum})}$  проти кількості водню  $Q_{H(\text{ev})}$ , що утворився після електрохімічного наводнювання. Виявлено, що для розглянутих випадків попереднє наводнювання–зневоднювання збільшує здатність сталі поглинати водень у 1,2–2 рази.

**Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України (проект 2020.02/0049).**

1. Nykyforchyn H. In-service degradation of pipeline steels. Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems / Eds. G. Bolzon, G. Gabetta, H. Nykyforchyn // Lecture Notes in Civil Eng. – 2021. – **102**. – P. 15–29.
2. Influence of electrochemical destruction products of protective coating on properties of pipe steel in neutral medium / L. Nyrkova, S. Osadchuk, S. Melnychuk, A. Rybakov, S. Ostapuyuk, and Yu. Borysenko // Materials Today: Proceedings. – 2019. – **6**, № 2. – P. 278–287.
3. Nyrkova L. Stress-corrosion cracking of pipe steel under complex influence of factors // Eng. Failure Analysis. – 2020. – **116**. – P. 104757.
4. Li M. C. and Cheng Y. F. Mechanistic investigation of hydrogen enhanced anodic dissolution of X-70 pipe steel and its implication on near-neutral pH SCC of pipelines // Electrochimica Acta. – 2007. – **52**. – P. 8111–8117.
5. Cheng Y. F. and Niu L. Mechanism for hydrogen evolution reaction on pipeline steel in near-neutral pH solution // Electrochemistry Communications. – 2007. – **9**. – P. 558–562.
6. Cheng Y. F. Fundamentals of hydrogen evolution reaction and its implications on near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines // Electrochimica Acta. – 2007. – **52**. – P. 2661–2667.
7. Розрахунок залишкового ресурсу магістральних трубопроводів з урахуванням дії середовища і деградації їх матеріалів / О. Є. Андрейків, І. Я. Долінська, І. П. Штойко, О. К. Райтер, Ю. Я. Матвій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 5. – С. 33–39. (Evaluation of the residual service life of main pipelines with regard for the action of media and degradation of materials / O. Y. Andreikiv, I. Y. Dolins'ka, I. P. Shtoiko, O. K. Raiter, and Y. Y. Matviiv // Materials Science. – 2019. – **54**, № 5. – P. 638–646.)
8. Дмитрах І. М., Сиротюк А. М., Лецак Р. Л. Особливості деформування та руйнування низьколегованих сталей у воденьвмісних середовищах: вплив концентрації водню в металі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 3. – С. 7–18. (Dmytrakh I. M., Syrotyuk A. M., and Leshchak R. L. Specific features of the deformation and fracture of low-alloy steels in hydrogen-containing media: influence of hydrogen concentration in the metal // Materials Science. – 2018. – **54**, № 3. – P. 295–308.)
9. Нуркова Л. І. Корозійне розтріскування трубної сталі X70 в умовах катодного захисту // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2020. – **56**, № 2. – С. 124–129. (Nyrkova L. I. Corrosion cracking of Kh70 pipe steel under the conditions of cathodic protection // Materials Science. – 2020. – **56**, № 2. – P. 273–278.)
10. Сиротюк А. М., Лецак Р. Л., Дорош М. І. Експериментальне та аналітичне оцінювання наводнення трубних сталей // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – **53**, № 6. – С. 62–67. (Syrotyuk A. M., Leshchak R. L., and Dorosh M. I. Experimental and analytic investigation of the hydrogenation of pipe steels // Materials Science. – 2018. – **53**, № 6. – P. 811–817.)
11. Shipilov S. A. and May I. L. Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection // Eng. Failure Analysis. – 2006. – **13**, № 7. – P. 1159–1176.
12. Influence of cathodic polarization on protective properties of thermoreactive coatings for main pipelines / S. O. Osadchuk, L. I. Nyrkova, A. O. Rybakov, and S. L. Melnychuk // J. of Hydrocarbon Power Eng. – 2018. – **5**, Is. 2. – P. 52–58.
13. Дмитрах І. М., Сиротюк А. М., Лецак Р. Л. Особливості електрохімічного наводнення низьколегованої сталі трубопроводу у модельному розчині ґрунтової води // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2021. – **57**, № 2. – С. 124–130.
14. Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement / J. Capelle, J. Gilgert, I. Dmytrakh, and G. Pluvinage // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2008. – **33**, № 24. – P. 7630–7641.
15. Yan M. and Weng Y. Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging // Corr. Sci. – 2006. – **48**, № 2. – P. 432–444.
16. Dmytrakh I. M., Leshchak R. L., and Syrotyuk A. M. Effect of hydrogen concentration on strain behaviour of pipeline steel // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2015. – **40**, № 10. – P. 4011–4018.
17. Dmytrakh I. M., Leshchak R. L., and Syrotyuk A. M. Experimental study of low concentration diffusible hydrogen effect on mechanical behaviour of carbon steel // Structural Integrity. – 2020. – **16**. – P. 32–37.

Одержано 26.02.2021