

## МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КИСНЮ НА КОРОЗІЮ ТА НАВОДНЮВАННЯ ТРУБНОЇ СТАЛІ У СІРКОВОДНЕВИХ СЕРЕДОВИЩАХ

М. С. ХОМА<sup>1</sup>, М. Р. ЧУЧМАН<sup>1</sup>, Х. Б. ВАСИЛІВ<sup>1</sup>,  
Н. Б. РАЦЬКА<sup>1</sup>, Ю. І. КОВАЛЬЧИК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

<sup>2</sup> Львівський національний університет природокористування

Розроблено експериментальну установку для корозійних випробувань сталей у мінералізованих середовищах за різних співвідношень парціальних тисків сірководню і повітря. Досліджено корозію та наводнювання сталі 17Г1С-У у хлоридно-ацетатному розчині, барботованому сірководнем, повітрям та їх сумішшю. Під час короткочасних електрохімічних випроб після додавання кисню у сірководневе середовище корозія уповільнюється. Внаслідок взаємодії з киснем концентрація сірководню у розчині знижується і катодні реакції гальмуються. За довготривалих випробувань у розчині за співвідношення тисків  $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{air}} 1 : 10$  швидкість корозії сталі підвищується у 1,5–2 рази. Кисень ускладнює формування сульфідовмісного шару на поверхні сталі через окиснення сульфідів з утворенням гідрофобних включень сірки та гідроксиду заліза. Сульфідні плівки втрачають свої бар'єрні властивості: збільшується їх пористість, зменшується товщина і адгезія до металу. Через вибіркоче витравлювання фериту з поверхні сталі в результаті корозії збільшується реальна площа контакту металу зі середовищем та активізується з часом корозія.

**Ключові слова:** кисень, сірководень, корозія, наводнювання, сталь.

An experimental installation was developed for corrosion tests of steels in mineralized environments at different ratios of partial pressures of hydrogen sulfide and air. Corrosion and hydrogenation of 17G1S-U steel were studied in a chloride-acetate solution bubbled with hydrogen sulfide, air, and their mixtures. The addition of oxygen to a hydrogen sulfide environment slows corrosion in short-term electrochemical tests. The concentration of hydrogen sulfide in the solution decreases as a result of interaction with oxygen and cathodic reactions slow down. The corrosion rate of steel is accelerated in 1.5–2 times during long-term tests in a solution with a ratio of  $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{air}} 1 : 10$ . Oxygen complicates the formation of a sulfide-containing layer on the steel surface due to the oxidation of sulfides with the formation of hydrophobic inclusions of sulfur and iron hydroxide. Sulfide films lose their barrier properties: their porosity increases, thickness and adhesion to the metal decreases. Selective etching of ferrite from the steel surface as a result of corrosion was recorded, thus leading to an increase in the real contact area of the metal with the environment and corrosion acceleration with time.

**Keywords:** oxygen, hydrogen sulfide, corrosion, hydrogenation, steel.

**Вступ.** Природний газ із газоносних пластів, супутні гази та з газоконденсатних родовищ, як правило, містять домішки сірководню, які за присутності вологи корозійно активні. Найнебезпечніший у видобувному газі сірководень, який інтенсифікує корозію та наводнювання сталей, а отже, пришвидшує їх корозійно-механічне руйнування. На ці процеси суттєво впливають сульфіди, що утворюються на поверхні кородівного металу. Залежно від хімічного складу та щільності вони

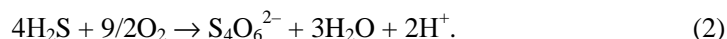
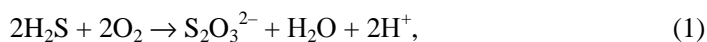
можуть локалізувати корозію, знижувати водневу перенапругу, а також посилювати абсорбцію водню та окрихчення сталей.

Під час ремонтних робіт через погану деаерацію, неякісні ущільнення тощо у корозивне середовище може потрапляти кисень. Через забруднення ним середовищ, що містять сірководень, може різко (до двох порядків) підвищитись швидкість корозії сталей [1–5]. Кисень суттєво ускладнює корозійні процеси, активізуючи їх як деполяризатор, може взаємодіяти зі сульфідовмісними продуктами корозії та з самим сірководнем, змінюючи його дію. В результаті таких реакцій утворюються оксиди, сульфіди та елементарна сірка, які також неоднозначно впливають на корозію. Можливе накопичення її у продуктах тривалентного заліза. Кисень може також послаблювати виділення водню і наводнювання металу. Згадані корозійні процеси дуже чутливі до зміни температури, співвідношення парціальних тисків сірководню та кисню. На сьогодні систематичних досліджень параметрів, що впливають ці явища, недостатньо [1–9].

Корозію заліза у насиченому сірководнем водному розчині NaCl (35 g/l), який містить 500 ppb кисню, вивчали раніше [1–4]. Встановили, що основною сполукою у її продуктах як за присутності кисню, так і без нього є макінавіт. У розчині без кисню шар продуктів корозії має значну товщину. За присутності кисню його товщина та адгезія до заліза зменшуються. Під час взаємодії розчинених у воді сірководню і кисню можуть утворюватися йони тіосульфату ( $S_2O_3^{2-}$ ) чи тетратіонату ( $S_4O_6^{2-}$ ), які з часом перетворюються у сульфат-йони ( $SO_4^{2-}$ ). Реакції супроводжуються виділенням йонів  $H^+$  і зниженням рН, через що збільшується швидкість корозії сталі [2]. За присутності кисню потік водню крізь залізну мембрану зменшується, що пояснюють блокувальною дією продуктів корозії [1].

Досліджували вплив температури на корозію вуглецевої сталі Х65 у розчині NaCl (1 g/l), крізь який пропускали суміш  $H_2S$  і повітря (за співвідношення об'ємів  $H_2S$  до  $O_2$  5:1) [5]. Виявили, що сульфати – основні стійкі продукти реакції сірководню з киснем, які формуються за будь-яких температурних умов. Їх концентрація лінійно зростає з підвищенням температури і тривалості випроб. Сульфат-йони  $SO_3^{2-}$  зафіксували лише при 25°C, тіосульфат  $S_2O_3^{2-}$  – при 25; 40 і 60°C, а при 40; 60 і 80°C – значну кількість елементарної сірки. Швидкість корозії найвища при 60°C. Підтвердили, що кисень навіть у незначній кількості (у вигляді слідів) може змінювати склад сірководневмісного середовища; швидкість корозії та продукти корозії, зменшуючи їх товщину, пористість і адгезію до металу, а також впливати на наводнювання сталі [5].

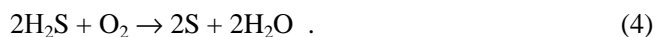
Запропонували такі реакції взаємодії  $O_2$  і  $H_2S$  з утворенням тіосульфат-, тетратіонат- та сульфат-йонів [5]:



Стабільніші сполуки формуються внаслідок реакції



Взаємодія кисню з сірководнем з утворенням сірки:



Тіосульфат-йони в середовищі суттєво підвищують швидкість корозії сталі, оскільки беруть участь в електрохімічних реакціях [6].

У праці [7] вивчали швидкість корозії та схильність до розтріскування сталі API Spec 5CT C110 (wt%): 0,17 C; 0,20 Si; 0,47 Mn; 0,0055 P; 0,0013 S; 0,48 Cr; 0,75 Mo; 0,017 Ni; 0,027 Nb; 0,11 V; 0,020 Ti; 0,024 Cu; 0,0031 B; 0,021 Al; Fe – решта) у розчині 4,96 g/l NaCl за різного співвідношення парціальних тисків  $H_2S$  і  $O_2$  та навантаження 500 МПа ( $\sim 0,63 \sigma_T$ ). Швидкість корозії та схильність до роз-

тріскування сталі значно зростають зі збільшенням парціального тиску кисню. Зокрема, за співвідношень  $P_{\text{H}_2\text{S}}/P_{\text{O}_2}$  25:1; 50:1; 100:1 і 1:0 продукти корозії на поверхні компактні, майже відсутні виразкові пошкодження, руйнування зразків не виявили. Швидкість корозії  $< 0,3 \text{ mm/year}$ . У середовищах з високим вмістом кисню ( $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{O}_2}$  1:1; 5:1 і 10:1) швидкість корозії значно більша (відповідно, 2,8; 1,5 та  $0,7 \text{ mm/year}$ ). На робочій поверхні зразків є гострі виразки, з дна яких починалися тріщини, перпендикулярні до прикладеного навантаження. За присутності  $\text{H}_2\text{S}$  і  $\text{O}_2$  під час утворення тріщин на межах мартенситу виявили корозію та індуковане киснем фазове перетворення сульфідів. Внаслідок перетворення і окиснення макінавіту формується пориста плівка продуктів корозії, яка не може діяти як ефективний дифузійний бар'єр. Через надходження кисню в середовище руйнування сталі спричиняють механізми водневого розтріскування і анодного розчинення, що охоплюють реакції окиснення  $\text{H}_2\text{S}$ , корозію металу, зміну структури та хімічного складу продуктів корозії, деградацію та розтріскування багаточастинкових меж мартенситу [7].

Також актуально дослідити вплив кисню на швидкість корозії сталі у складніших системах. Тому вивчали корозійну поведінку сталі L245NS у багатокомпонентному високотемпературному середовищі, яке містить кисень, азот, сірководень, вуглекислий газ, діоксид сірки і водяну пару під високим тиском [6, 9]. Аналізували вплив компонентів середовища на швидкість корозії сталі і виявили, що її визначають кисень, сірководень і температура середовища у послідовності:  $\text{O}_2 > \text{H}_2\text{S} > \text{температура} > \text{CO}_2 > \text{SO}_2$  [6, 9]. Зі зростанням концентрації кисню швидкість корозії збільшується, а з підвищенням температури та концентрації  $\text{H}_2\text{S}$  спочатку зростає, а далі знижується [6].

Отже, на сьогодні корозійні та корозійно-механічні процеси на сталях у сірководневих середовищах за присутності кисню вивчено недостатньо. Це стосується й електрохімічних особливостей корозії сталей у середовищах з різною концентрацією  $\text{O}_2$  і  $\text{H}_2\text{S}$ , впливу продуктів корозії, що містять і оксиди, і сульфідів, на наводнювання, окрихчення та трибокорозію сталей. Тому важливо дослідити опірність трубних сталей корозії у середовищах з різними концентраціями кисню та сірководню, враховуючи характер корозії, склад її продуктів та наводнювання.

Нижче вивчено корозію та наводнювання сталі 17Г1С-У у хлоридно-ацетатному розчині за різного співвідношення парціальних тисків сірководню і кисню.

**Методика випроб.** Методи корозійних випробувань у середовищах за різних парціальних тисків  $\text{H}_2\text{S}/\text{O}_2$  подібні [1–10]. Спочатку тестовий розчин та зразки дегазують в автоклаві, щоб видалити кисень. Далі сірководень змішують з чистим киснем чи його сумішами згідно з експериментальною схемою і вводять в автоклав. Використовують чистий кисень, його суміш з азотом, або повітря.

Для корозійних випробувань сталей у мінералізованих середовищах, барботованих повітряно-сірководневою сумішшю, використовували експериментальну установку (рис. 1). У скляній ємності на спеціальному тримачі підвішували заздалегідь шліфовані і знежирені зразки 5. Ємність заповнювали робочим розчином ( $5\% \text{ NaCl} + 0,5\% \text{ CH}_3\text{COOH}$ ), крізь який пропускали суміш сірководню і повітря як джерело кисню ( $20,9 \text{ vol.}\%$ ). Сірководень подавали з балона 1, повітря – компресором 9 і змішували їх перед барботуванням. Надлишковий газ виводили назовні через трубку 12 і утилізували. Розчин безперервно перемішували спеціальною мішалкою 6 з електродвигуном 4. Парціальний тиск  $\text{H}_2\text{S}$  і повітря контролювали з точністю до кількох кПа за допомогою двох систем, що склалися з клапанів 11, ротаметрів 2 і водяних манометрів 8 з капіляром 3. Результати отримували за співвідношення парціальних тисків сірководню і повітря 1:10, що відповідає співвідношенню сірководню і кисню  $\sim 1:2$ . Робоче середовище підігрівали нагрівачем 7, температуру контролювали термopарою 10.

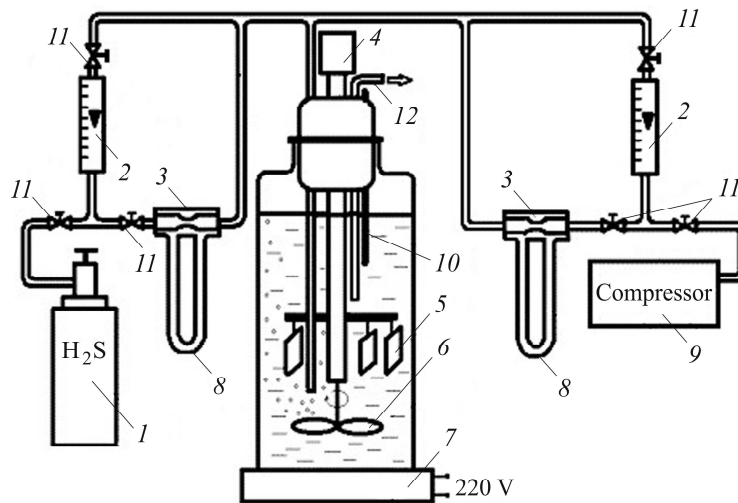


Рис. 1. Схема експериментальної установки для корозійних випробувань сталей у мінералізованих середовищах, барботованих повітряно-сірководневою сумішшю.

Fig. 1. Scheme of the experimental installation for corrosion tests of steels in mineralized environments, bubbled with a mixture of  $H_2S$  and air.

Досліджували феритно-перлітну сталь 17Г1С-У (mass%: 0,17 C; 0,47 Si; 1,4 Mn; <0,3 Cr; 0,3 Ni; <0,3 Cu, Fe – решта). Випробовували 720 h у розчині 5% NaCl + + 0,5%  $CH_3COOH$  (рН 2,7), крізь який безперервно пропускали сірководень за концентрації насичення, повітря та їх суміш за співвідношення парціальних тисків  $P_{H_2S} : P_{air} 1 : 10$ , температури  $25^\circ C$  і загального тиску 0,1 МПа. Швидкість корозії розраховували за формулою  $K_m = (m_0 - m)/(S\tau)$ , де  $m_0, m$  – маса зразка до і після експерименту, g;  $S$  – його площа,  $m^2$ ;  $\tau$  – час витримки у корозивному середовищі, h. Глибинний показник корозії оцінювали за формулою  $K_{year} = 1,11K_m$  (mm/year).

Для дослідження електрохімічних характеристик корозійних процесів розчин барботували сірководнем, повітрям та їх сумішшю за співвідношення парціальних тисків  $P_{H_2S} : P_{air} 0:1, 1:100, 1:10, 1:1, 1:0$ . Випробовували у стандартній комірці, використовуючи потенціостат ПИ-2МК-10А. Електрод порівняння – хлоридсрібний типу ЭВЛ-1М1, допоміжний – платиновий. Швидкість розгортки потенціалу 1 mV/s.

Концентрацію водню в зразках визначали аналізатором LECO DH 603. Мікроструктуру, хімічний склад та товщину продуктів корозії на сталі вивчали на сканувальному електронному мікроскопі EVO 40XVP зі системою мікрорентгено-спектрального аналізу, застосовуючи енергодисперсійний спектрометр INCA ENERGY 350.

**Результати та їх обговорення.** Встановили (див. рис. 2 і таблицю), що у розчині, насиченому сірководнем, потенціали корозії найвід’ємніші і становлять  $-0,643$  V. Час їх стабілізації 2000...3000 s. Зі збільшенням парціального тиску кисню вони поступово зміщуються в бік додатніших значень: за  $P_{H_2S} : P_{air} 1:1$  – на 8 mV, 1:10 – на 23 mV, 1:100 – на 33 mV, а у розчині, насиченому повітрям, – на 50 mV. Корозію сталі у розчинах зі сірководнем та його сумішшю з киснем контролюють катодні процеси виділення водню з уповільненим перенесенням електронів (коефіцієнти Тафеля  $b_k = (-0,121...-0,123)$ ) (див. таблицю). Швидкість корозії (3,26 mm/year) найвища у розчині, насиченому сірководнем, а за присутності кисню зменшується приблизно на третину, незалежно від концентрації. Кисень взаємодіє зі сірководнем за реакцією (4), внаслідок чого концентрація  $H_2S$  і

O<sub>2</sub> у розчині знижується, що призводить до уповільнення катодних реакцій. У розчині, барботованому повітрям, корозію контролюють анодні реакції, і її швидкість становить 3,25 mm/year (див. таблицю).

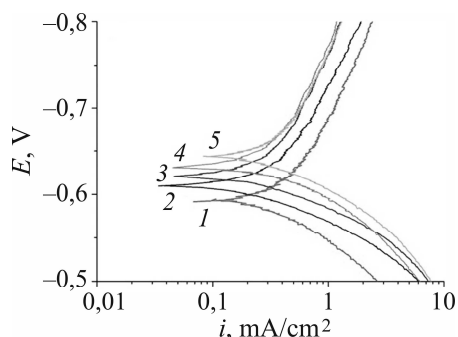


Рис. 2. Поляризаційні криві сталі 17Г1С-У у розчині 5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH, барботованому сірководнем, повітрям та їх сумішшю за співвідношення парціальних тисків  $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{air}}$ : 1 – 0:1; 2 – 1:100; 3 – 1:10; 4 – 1:1; 5 – 1:0.

Fig. 2. Polarization curves of 17G1S-U steel in a solution of 5% NaCl + 0.5% CH<sub>3</sub>COOH, bubbled with hydrogen sulfide, air, and their mixtures at a ratio of partial pressures  $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{air}}$ : 1 – 0:1; 2 – 1:100; 3 – 1:10; 4 – 1:1; 5 – 1:0.

#### Струми та потенціали корозії сталі 17Г1С-У у розчині 5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH за різного співвідношення парціальних тисків сірководню і повітря

| $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{air}}$ | $E_{\text{корр}}, \text{V}$ | $i_{\text{корр}}, \text{mA/cm}^2$ | $K_m, \text{mm/year}$ | $b_k$  | $b_a$ |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------|-------|
| 0 : 1                                     | -0,593                      | 0,281                             | 3,25                  | -0,127 | 0,097 |
| 1 : 100                                   | -0,61                       | 0,200                             | 2,31                  | -0,123 | 0,061 |
| 1 : 10                                    | -0,62                       | 0,178                             | 2,06                  | -0,123 | 0,060 |
| 1 : 1                                     | -0,635                      | 0,182                             | 2,11                  | -0,121 | 0,060 |
| 1 : 0                                     | -0,643                      | 0,282                             | 3,26                  | -0,123 | 0,089 |

У результаті довготривалих (720 h) корозійних випроб встановили, що у розчині, насиченому сірководнем, швидкість корозії сталі за перших 70 h знижується від ~2,8 до ~2 mm/year і стабілізується на цьому рівні впродовж ~400 h. Далі підвищується і через 720 h досягає 4,8 mm/year (рис. 3а, крива 1). Таке гальмування пов'язано з формуванням на поверхні бар'єрного сульфідомісного шару, який складається зі щільного макінавіту [10]. З часом макінавіт трансформується у троїліт і швидкість корозії зростає. Оскільки кристали троїліту володіють напівпровідниковими властивостями, то між поверхнею сталі і пористими продуктами корозії утворюються гальванопари, які інтенсифікують розвиток та локалізацію корозійних пошкоджень.

Корозія сталі у насиченому сірководнем розчині супроводжується наводнюванням. Концентрація абсорбованого водню за 720 h збільшується від 10 до 18 ppm (рис. 3b, крива 1) [10]. На поверхні сталі зафіксували блістери, виразки та тріщини, що свідчить про захоплення водню дефектами структури. З часом концентрація водню у дефектах збільшується, а його молізація призводить до виникнення численних підповерхневих тріщин, що є ознакою воднем ініційованого розтріскування (рис. 4).

У розчині, що містить суміш сірководню і повітря за співвідношення парціальних тисків  $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{air}}$  1 : 10, швидкість корозії сталі через 48 h витримки становить 4,12 mm/year, що у 1,5 раза більше, ніж у розчині, насиченому сірководнем (рис. 3а, крива 2). Упродовж 200 h вона дещо знижується внаслідок формування на поверхні плівки макінавіту, а з часом зростає, досягаючи 5,42 mm/year після витримки 720 h.

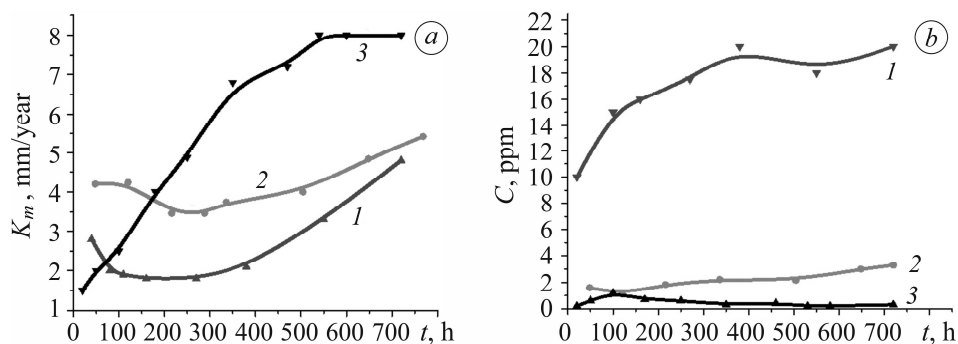


Рис. 3. Швидкість корозії (а) і концентрація абсорбованого водню (б) у сталі 17Г1С-У після витримки у хлоридно-ацетатному розчині за співвідношення тисків  $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{air}}$  1 : 0 (крива 1); 1 : 10 (крива 2) і 0 : 1 (крива 3).

Fig. 3. Corrosion rate (a) and the concentration of absorbed hydrogen (b) in 17G1S-U steel after exposure to a chloride-acetate solution at a ratio  $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{air}}$  1 : 0 (curve 1); 1 : 10 (curve 2) and 0 : 1 (curve 3).

За присутності кисню у сірководневому середовищі формування бар'єрного сульфидовмісного шару на поверхні сталі ускладнюють гідрофобні включення елементарної сірки, які утворюються за реакцією (4). Кисень також сприяє перетворенню макінавіту в троїліт і його подальшому окисненню з формуванням сірки та гідроксиду заліза за реакціями:

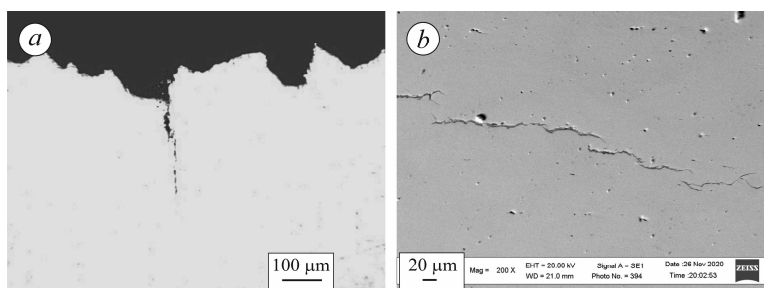
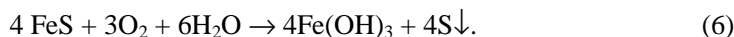
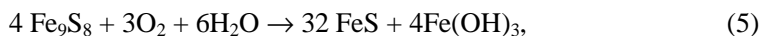


Рис. 4. Поперечний переріз поверхневого (а) і підповерхневого (б) шарів сталі 17Г1С-У після витримки 720 h у хлоридно-ацетатному розчині, насиченому сірководнем [11].

Fig. 4. Cross-section of the surface (a) and subsurface layers (b) of steel 17G1S-U after exposure for 720 h to a chloride-acetate solution saturated with hydrogen sulfide [11].

Внаслідок цих процесів сульфідні плівки втрачають бар'єрні властивості: збільшується їх пористість, зменшується товщина і адгезія до металу [10, 11]. Тому швидкість корозії підвищується і протікає з утворенням, в основному, оксидів та гідроксидів заліза.

Після корозійних випробувань у розчині за співвідношення тисків  $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{air}}$  1 : 10 продукти корозії мають слабку адгезію до поверхні сталі і легко видаляються під час промивання водою. Вони містять значну кількість гідроксидів заліза і елементарної сірки. На поверхні сталі (рис. 5а) зафіксували високу концентрацію кисню (20...60 mass%) і низьку – сірки (1...2 mass%). Її мікроструктура свідчить про вибіркове витравлювання фериту. Пришвидження корозії з часом пов'язане зі збільшенням площі поверхні виразок, сформованих після такого витравлювання (рис. 6).

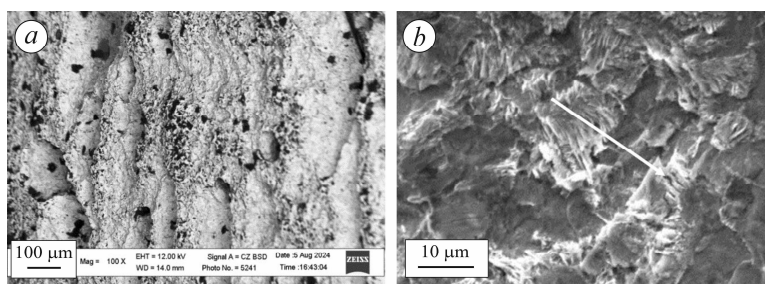


Рис. 5. Мікроструктура поверхні сталі 17Г1С-У після корозії впродовж 200 h у розчині 5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH, барботованому сумішшю сірководню і повітря за співвідношення їх парціальних тисків 1 : 10. Стрілка вказує на пластини цементиту, які залишилися у перлітних зернах після вибіркового витравлювання фериту.

Fig. 5. Microstructure of 17G1S-U steel surface after corrosion for 200 h in a solution of 5% NaCl + 0.5% CH<sub>3</sub>COOH bubbled with a mixture of hydrogen sulfide and air at a ratio of partial pressures 1 : 10. The arrow shows the cementite plates which remained in the pearlite grains after selective etching of ferrite.

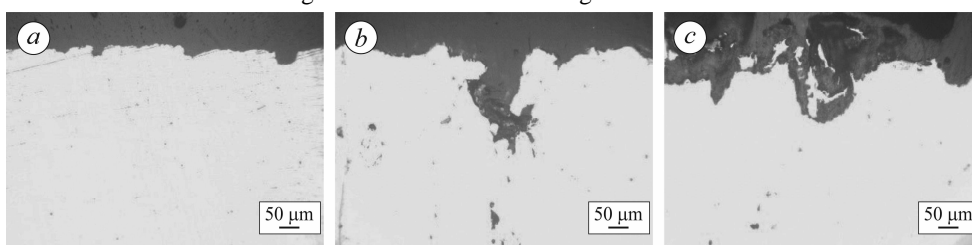


Рис. 6. Поперечний переріз приповерхневих шарів сталі 17Г1С-У після корозії у розчині 5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH за співвідношення парціальних тисків сірководню і повітря 1 : 10. Час витримки, h: *a* – 200; *b* – 500; *c* – 720.

Fig. 6. Cross-section of 17G1S-U steel near-surface layers after corrosion in a solution of 5% NaCl + 0.5% CH<sub>3</sub>COOH at a ratio of partial pressures of hydrogen sulfide and air 1 : 10. Exposure time, h: *a* – 200; *b* – 500; *c* – 720.

Об'єм водню, абсорбованого сталлю у розчині за співвідношення тисків  $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{air}} 1 : 10$ , на порядок менший, ніж у насиченому сірководнем (рис. 3*b*, крива 2). Після випробувань на поверхні і у приповерхневих шарах сталі тріщин не виявили, що свідчить про незначний вплив наводнювання (рис. 6). Проникненню водню в метал сприяють специфічні адсорбати (H<sub>2</sub>S, HS<sup>-</sup>), які відіграють роль проміжних реагентів під час відновлення протонів. У розчині з H<sub>2</sub>S і O<sub>2</sub>, їх вміст менший, ніж у середовищі чистого H<sub>2</sub>S, через реакцію з киснем з утворенням сірки та сульфату [11]. Також під час окиснення сульфідів заліза може утворюватися тіосульфат, здатний блокувати адсорбцію водню.

У розчині, барботованому повітрям, швидкість корозії найвища і майже лінійно зростає з часом, досягаючи 8 mm/year через 550 h, і надалі не змінюється (див. рис. 2*a*). Вона протікає з формуванням оксидів та гідроксидів заліза. Ріст її швидкості пов'язаний з накопиченням у бар'єрному шарі FeO і магнетиту, які володіють напівпровідниковими властивостями і утворюють гальванопару з поверхнею сталі. З часом товщина бар'єрного шару продуктів корозії збільшується (до 1 mm через 500 h), тому її швидкість дещо зменшується. Наводнювання сталі практично відсутнє.

### ВИСНОВКИ

Розроблено експериментальну установку для корозійних випробувань сталей у мінералізованих середовищах за різного співвідношення парціальних тисків сірководню і повітря. Електрохімічні дослідження сталі 17Г1С-У у хлоридно-

ацетатному розчині, барботованому сірководнем, повітрям та їх сумішню, за-свідчили, що після додавання кисню у сірководневе середовище корозія уповільнюється. Внаслідок взаємодії з киснем концентрація сірководню у розчині знижується і катодні реакції гальмуються. За довготривалих випробувань у розчині за співвідношення тисків  $P_{\text{H}_2\text{S}} : P_{\text{air}} 1 : 10$  кисень пришвидшує корозію сталі у 1,5–2 рази та ускладнює формування сульфідовмісного шару на її поверхні через утворення гідроксиду заліза та окиснення сульфідів до гідрофобних включень сірки. Сульфідні плівки втрачають свої бар'єрні властивості: збільшується їх пористість, зменшується товщина і послаблюється адгезія до металу. Зафіксовано вибіркоче витравлювання фериту з поверхні сталі і відсутність тріщин, що свідчить про незначний вплив наводнювання.

1. *Impact of oxygen on corrosion and hydrogen permeation of pure iron in the presence of H<sub>2</sub>S* / J. Kittel, N. Ferrando, M. D. D. Ayagou, C. Mendibide, E. Sutter, T. T. M. Tran, and B. Tribollet // Eurocorr. – 2017. – Article number 02462631. <https://ifp.hal.science/hal-02462631>
2. *Impact of oxygen contamination on the electrochemical impedance spectroscopy of iron corrosion in H<sub>2</sub>S solutions* / M. D. D. Ayagou, G. R. Joshi, T. T. M. Tran, B. Tribollet, E. Sutter, C. Mendibide, C. Duret-Thual, and J. Kittel // Corr. Sci. – 2020. – **164**. – Article number 108302. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108302>
3. *Electrochemical impedance spectroscopy of iron corrosion in H<sub>2</sub>S solutions* / M. D. Deffo Ayagou, M. Tran, B. Tribollet, J. Kittel, E. Sutter, N. Ferrando, Ch. Mendibide, and C. Duret-Thual // Electrochimica Acta. – 2018. – **282**. – P. 775–783. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.06.052M>
4. *Corrosion and hydrogen permeation in H<sub>2</sub>S environments with O<sub>2</sub> contamination, 1: Tests on pure iron at high H<sub>2</sub>S concentration* / M. D. D. Ayagou, C. Mendibide, C. Duret Thual, K. Belkhadiri, M. T. T. Tuyet, E. Sutter, B. Tribollet, N. Ferrando, and J. Kittel // Corrosion. – 2018. – **74**, № 11. – P. 1192–1202. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108302>
5. *Effect of O<sub>2</sub> and temperature on sour corrosion* / Y. Song, A. Palencsár, G. Svenningsen, J. Kvarekvål, and T. Hemmingsen // Corrosion. – 2012. – **68**, № 7. – P. 662–671. <https://doi.org/10.5006/0341>
6. *Influence of environmental parameters on corrosion mechanisms of steels used in oil field* / L. Sow, J. Idrac, P. Mora, and E. Font // Mater. and Corr. – 2015. – **66**. – P. 1245–1249. <https://doi.org/10.1002/maco.201408156>
7. *Combined effect of hydrogen embrittlement and corrosion on the cracking behaviour of C110 low alloy steel in O<sub>2</sub>-contaminated H<sub>2</sub>S environment* / Y. Long, W. Song, A. Fu, J. Xie, Y. Feng, Z. Bai, C. Yin, Q. Ma, N. Ji, and X. Kuang // Corr. Sci. – 2022. – **194**. – Article number 109926. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109926>
8. *Investigation into main controlling factors and prediction model of L245NS steel corrosion rate in CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-SO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S-H<sub>2</sub>O environment* / K. Liao, J. Leng, Y. F. Cheng, Q. Zou, T. He, L. Chen, M. Qin, X. Liu, and S. Zhao // Mater. Chem. and Phys. – 2023. – **309**. – Article number 128414. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0254058423011227>
9. *Investigation of corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel coiled tubing in complex operation environments of oil and gas wells* / J. Luo, P. Yan, Y. Fan, S. Lu, and Y. Long // Eng. Failure Analysis. – 2023. – **151**. – Article number 107355. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107355>
10. *Khoma M. S., Vasylyv Ch. B., and Chuchman M. R. Influence of the hydrogen sulfide concentration on the corrosion and hydrogenation of pipe steels (A survey)* // Materials Science. – 2021. – **57**, № 3. – P. 308–318. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00546-x>
11. *Corrosion-mechanical properties and susceptibility to hydrogenation of pipe steel in the presence of carbon dioxide gas and hydrogen sulphide in environment* / M. S. Khoma, V. I. Pokhmurskii, M. R. Chuchman, Ch. B. Vasylyv, V. R. Ivashkiv, and N. B. Ratska // Materials Science. – 2023. – **59**, № 2. – P. 205–212. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00764-z>

Одержано 10.09.2024