

КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА СХИЛЬНІСТЬ ДО НАВОДНЮВАННЯ ТРУБНОЇ СТАЛІ ЗА НАЯВНОСТІ В СЕРЕДОВИЩІ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ І СІРКОВОДНЮ

М. С. ХОМА, В. І. ПОХМУРСЬКИЙ, М. Р. ЧУЧМАН,
Х. Б. ВАСИЛІВ, В. Р. ІВАШКІВ, Н. Б. РАЦЬКА

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

Досліджено вплив різних концентрацій CO_2 та H_2S у хлоридно-ацетатному розчині на корозійно-механічні властивості сталі 17Г1С-У. У розчині, насиченому CO_2 , швидкість корозії сталі нижча, ніж за присутності H_2S , але зростає з часом через відсутність захисних карбонатних плівок на поверхні, параметри пластичності у 2–2,7 рази менші, ніж у повітрі, внаслідок виразкових пошкоджень. Швидкість корозії та наводнювання сталі визначає концентрація у середовищі сірководню. За вмісту 100 mg/dm^3 формуються щільні плівки композиції троїліт–макінавіт, які гальмують корозію, за вищого швидкості корозії зростає через трансформацію сульфідів і утворення дефектніших поверхневих шарів. За концентрації H_2S від 100 mg/dm^3 характеристики міцності сталі знижуються на третину, а пластичності – в 3–5 разів.

Ключові слова: *трубні сталі, вуглекислий газ, сірководень, корозія, наводнювання, механічні властивості, мікроструктура.*

The effect of different concentrations of CO_2 and H_2S in a chloride-acetate solution on the corrosion-mechanical properties of 17Г1С-У steel is studied. In a solution saturated with CO_2 , the corrosion rate of steel is lower than in the presence of H_2S , but increases over time due to the absence of protective carbonate films on the surface, plasticity parameters are 2–2.7 times lower than in air, due to ulcerated surface damage. The corrosion rate and hydrogenation of steel is determined primarily by the hydrogen sulfide concentration in the environment. At a concentration of 100 mg/dm^3 , dense films of the troilite-mackinavite composition are formed, which inhibit corrosion. At higher concentrations, the corrosion rate increases due to the sulfides transformation and the formation of surface layers with defects. With an increase in the H_2S concentration from 100 mg/dm^3 , the strength characteristics of steel decrease in three, and plasticity by 3–5 times.

Keywords: *pipe steels, carbon dioxide, hydrogen sulfide, corrosion, hydrogenation, mechanical properties, microstructure.*

Вступ. Трубопроводи сьогодні – найдешевший спосіб транспортування газу і нафти. Для виробництва труб, як правило, використовують низьколеговані маловуглецеві сталі, які схильні до деградації за присутності в транспортованих середовищах вуглекислого газу і сірководню. Розчинені гази пришвидшують корозію та наводнювання сталі, що погіршує її механічні властивості та спричиняє утворення тріщин [1–5].

Вуглекислий газ є невід’ємним компонентом видобувного газу, газових конденсатів, а також супутніх газів нафти. Його концентрація в газі може коливатися від 0,01 до 20%, а у пластовій воді – від 30 до 50%. Газ вважають сірководнево-вмісним за парціального тиску сірководню від 0,08%, який, як правило, присутній у глибоких пластах газових родовищ. Його вміст у вітчизняних родовищах

становить $8 \cdot 10^{-5} \dots 3,1\%$. [6]. У результаті розчинення вуглекислого газу в середовищі збільшується концентрація карбонатної кислоти і швидкість корозії може досягати кілька міліметрів на рік [7–9].

Під час взаємодії сірководню зі сталями утворюються сульфіди зі складною кристалічною структурою, найчастіше – макінавіт (тетрагональний Fe_{1+x}S), кубічний FeS та троїліт (стехіометричний гексагональний FeS) [10]. За таких умов відбуваються відновлення йонів водню та наводнення сталі, що викликає специфічні пошкодження – воднем ініційоване розтріскування і розшарування металу (блістерінг).

За одночасної присутності в середовищі CO_2 і H_2S на поверхні сталі можуть утворюватися плівки, що містять карбонати і сульфіди заліза [4, 8]. Склад продуктів корозії залежить від конкурентної здатності карбонату заліза і макінавіту [8]. Такі плівки впливають на швидкість корозії та наводнення сталі, оскільки можуть уповільнювати ці процеси, створюючи дифузійний бар'єр для компонентів середовища і сталі. Їх структура і властивості залежать від парціальних тисків CO_2 і H_2S , pH середовища, розчинності компонентів сталі, температури тощо. Характер пошкоджень визначають залишкові чи прикладені ззовні або всередині труби напруження, а також дефектність сталі.

Нижче вивчено вплив співвідношення концентрацій CO_2 та H_2S у хлоридно-ацетатному розчині на корозійно-механічні властивості та наводнення сталі 17Г1С-У.

Методика випроб. 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) досліджували в розчині 5% NaCl + 0,5% CH_3COOH (pH 2,7), що є основою розчину NACE – стандартного для вивчення корозії та корозійно-механічного руйнування у сірководневих середовищах [11]. Розчини безперервно барботували аргонем, вуглекислим газом або сірководнем. Також готували суміші аргону чи вуглекислого газу зі сірководнем за різного співвідношення парціальних тисків, які пропускали крізь хлоридно-ацетатний розчин, підтримуючи в ньому концентрацію сірководню 100 або $500 \text{ mg/dm}^3 \pm 10\%$. Випробовували за температури 25°C і загального тиску 0,1 МПа. Швидкість корозії (K_m) розраховували за формулою: $K_m = (m_0 - m) / (S \cdot \tau)$, де m_0 , m – маса зразка до і після експерименту, відповідно, g; S – його площа, m^2 ; τ – час витримки у корозивному середовищі, h. Корозійні втрати сталі впродовж року оцінювали за формулою $K_y = 1,11K_m$.

Електрохімічні характеристики корозійних процесів досліджували у потенціодинамічному режимі з допомогою потенціостата ПИ-2МК-10А. Електрод порівняння – хлоридсрібний типу ЭВЛ-1М1, допоміжний – платиновий. Швидкість розгортання потенціалу 1 mV/s . Концентрацію водню в зразках визначали аналізатором LECO DH 603. Вплив концентрації сірководню на механічні властивості сталі за розтягу зі сталюю швидкістю 10^{-6} s^{-1} у розчині 5% NaCl + 0,5% CH_3COOH , насиченому вуглекислим газом, досліджували на установці УВП. Мікроструктуру, хімічний склад та товщину продуктів корозії – на сканувальному електронному мікроскопі EVO 40XVP зі системою мікрорентгеноспектрального аналізу, використовуючи енергодисперсійний спектрометр INCA ENERGY 350.

Результати та їх обговорення. Електрохімічні дослідження засвідчили, що у насиченому вуглекислим газом хлоридно-ацетатному розчині електродний потенціал сталі становить $-0,575 \text{ V}$, а густина струму корозії $0,091 \text{ mA/cm}^2$. Після додавання в розчин сірководню він зміщується в катодний бік: за концентрації 100 і 500 mg/dm^3 , відповідно, на ~ 39 і 55 mV , а в насиченому розчині – на 70 mV . За його вмісту 100 mg/dm^3 швидкість корозії не змінюється, а за концентрації

500 mg/dm³ та у насиченому розчині збільшується незначно – на ~ 6,4 і ~ 20,8% (рис. 1; табл. 1). Тафельські нахили поляризаційних кривих у всіх розчинах практично не відрізняються. Отже, сірководень не змінює характеру корозійних процесів. Вуглекислий газ у хлоридно-ацетатному розчині з рН 2,7 пришвидшує корозію більш ніж удвічі порівняно з розчином, знекисленим аргоном [12]. Таким чином, за короткочасних випробувань, якими є електрохімічні дослідження, вплив сірководню на корозію у присутності вуглекислого газу незначний. Під час поляризації за потенціалів, від'ємніших за ~ 750 mV, швидкість катодних реакцій зростає внаслідок безпосереднього відновлення водню із молекули H₂S, подібно, як у середовищах з аргоном та різною концентрацією сірководню.

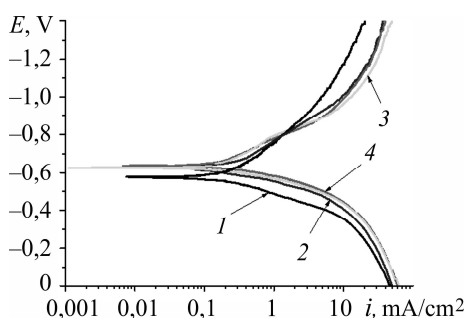


Рис. 1. Поляризаційні криві сталі 17Г1С-У у хлоридно-ацетатному розчині:

- 1 – насиченому CO₂;
- 2 – CO₂ + 100 mg/dm³ H₂S;
- 3 – CO₂ + 500 mg/dm³ H₂S;
- 4 – насиченому H₂S.

Fig. 1. Polarization curves of 17Г1С-У steel in a chloride-acetate solution for the concentration of dissolved gases:

- 1 – CO₂ (saturated);
- 2 – CO₂ + 100 mg/dm³ H₂S;
- 3 – CO₂ + 500 mg/dm³ H₂S;
- 4 – H₂S (saturated).

Таблиця 1. Вплив різного співвідношення концентрацій сірководню та вуглекислого газу в розчині 5% NaCl + 0,5% CH₃COOH на електрохімічні властивості сталі 17Г1С-У

Співвідношення концентрацій газів у розчині	E_{corr} , V	I_{corr} , mA/cm ²
CO ₂ (sat)	-0,575	0,091
CO ₂ + 100 mg/dm ³ H ₂ S	-0,614	0,091
CO ₂ + 500 mg/dm ³ H ₂ S	-0,630	0,098
H ₂ S (sat)	-0,645	0,110

Виявили, що швидкість корозії сталі в розчині 5% NaCl + 0,5% CH₃COOH + CO₂ без сірководню впродовж 720 h у розчині найнижча і становить 0,2... 0,8 mm/year (рис. 2a). За його вмісту 100 і 500 mg/dm³ початкова швидкість корозії дорівнює у середньому 0,95 і 1,2 mm/year, а в насиченому – 2,8 mm/year. Упродовж перших 240...300 h витримки корозія уповільнюється, найбільше – у насиченому розчині (майже на 60%). У середовищах з 500 і 2800 mg/dm³ H₂S вона знову зростає, збільшуючись у 2–2,5 рази після 720 h витримки (рис. 2a). У розчині, що містить 100 mg/dm³ H₂S, упродовж 720 h знижується від 0,95 до 0,46 mm/year.

У хлоридно-ацетатному розчині, що містить аргон замість вуглекислого газу, залежність швидкості корозії від часу подібна (рис. 2b) і залежить від концентрації сірководню.

У хлоридно-ацетатному розчині з рН 2,7, насиченому вуглекислим газом, карбонати заліза не утворюються і швидкість корозії з часом зростає. За наявності сірководню на початковому етапі швидкість загальної корозії знижується в

результаті утворення на поверхні сульфідних плівок. За концентрації 100 mg/dm^3 H_2S швидкість корозії найнижча. На поверхні формуються щільні сульфідні плівки, які гальмують дифузію йонів. Їх структура відповідає композиції сульфідів троїліт–макінавіт ($\text{FeS-Fe}_{1+x}\text{S}$) [13, 14]. За вмісту 500 і 2800 mg/dm^3 H_2S швидкість корозії сталі гальмується на початку експозиції, але через деякий час зростає (рис. 2а). Це пов'язано з трансформацією сульфідів і формуванням нещільних плівок троїліту FeS [13] з кубічною структурою та утричі більшим розміром кристалітів (рис. 3).

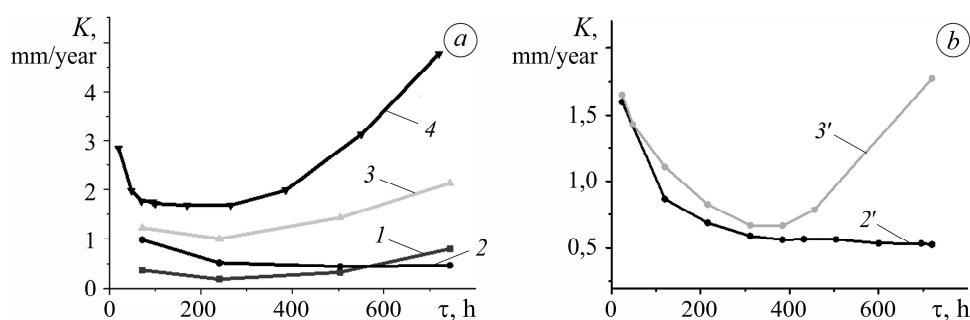


Рис. 2. Вплив концентрації сірководню на залежність швидкості корозії сталі 17Г1С-У від тривалості витримки у розчині 5% NaCl + 0,5% CH_3COOH з вуглекислим газом (а) та аргонном (b): 1 – $\text{CO}_2(\text{sat})$; 2, 3 – CO_2 + 100 і 500 mg/dm^3 H_2S ; 4 – $\text{H}_2\text{S}(\text{sat})$; 2', 3' – Ar + 100 і 500 mg/dm^3 H_2S .

Fig. 2. Dependence of 17Г1С-У steel corrosion rate on hydrogen sulfide concentration during long-term exposure in a solution of 5% NaCl + 0.5% CH_3COOH with carbon dioxide (a) and argon (b): 1 – $\text{CO}_2(\text{sat})$; 2, 3 – CO_2 + 100 and 500 mg/dm^3 H_2S ; 4 – $\text{H}_2\text{S}(\text{sat})$; 2', 3' – Ar + 100 and 500 mg/dm^3 H_2S .

Таким чином, розвиток корозійних процесів у сірководневих середовищах можна розділити на два періоди. Під час першого формуються сульфідні плівки, які гальмують корозію, створюючи дифузійний бар'єр для компонентів і середовища, і сталі. Початкова швидкість корозії зростає зі збільшенням агресивності корозивного розчину. Під час другого після 100...300 h, залежно від середовища, корозія пришвидшується, що зумовлено трансформацією сульфідів і виникненням дефектніших поверхневих шарів.

У розчині, насиченому вуглекислим газом, концентрація абсорбованого водню не перевищує $0,8 \text{ ppm}$ (рис. 4, крива 1). За вмісту 100 mg/dm^3 H_2S становить $4...5 \text{ ppm}$, а з його збільшенням від 500 mg/dm^3 до насичення катодні реакції інтенсифікуються і вона досягає, відповідно, $\sim 7...10$ і $\sim 14...18 \text{ ppm}$ (рис. 4). Збільшення розкиду експериментальних даних з підвищенням концентрації сірководню можна пояснити захопленням водню пастками – дефектами структури та його вторинним перерозподілом в об'ємі зразка.

Подібні залежності абсорбції водню сталлю від концентрації сірководню виявили у розчині 5% NaCl + 0,5% CH_3COOH , насиченому аргонном. Зокрема,

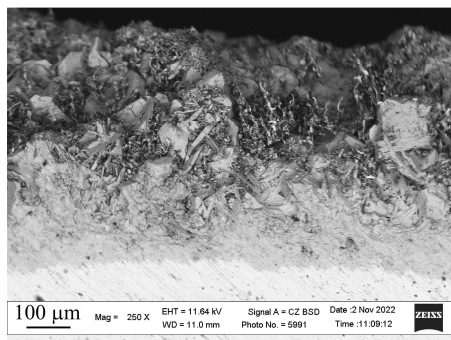


Рис. 3. Мікроструктура сульфідної плівки, сформованої на поверхні сталі 17Г1С-У.

Fig. 3. Microstructure of the sulfide film on the surface of 17Г1С-У steel.

вміст абсорбованого водню у сталі після 720 h витримки у розчині без сірководню становить 1 ppm, за концентрацій 100; 500 і 2800 mg/dm³ – відповідно, ~ 4; ~ 10 і ~ 20 ppm [12]. Таким чином, інтенсивність наводнювання сталі у хлоридно-ацетатному розчині залежить, насамперед, від концентрації сірководню. Заміна аргону на вуглекислий газ практично не впливає на цей процес.

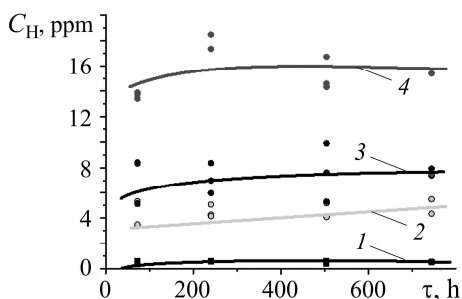


Рис. 4. Залежність концентрації абсорбованого водню від тривалості витримки сталі 17Г1С-У в розчині 5% NaCl + 0,5% CH₃COOH + CO₂ з різними концентраціями сірководню: 1 – 0; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 2800 mg/dm³.

Fig. 4. Dependence of the absorbed hydrogen concentration on the exposure duration of 17Г1С-У steel in a solution of 5% NaCl + 0.5% CH₃COOH + CO₂ with different concentrations of hydrogen sulfide: 1 – 0; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 2800 mg/dm³.

Після витримки сталі у розчині 5% NaCl + 0,5% CH₃COOH, насиченому вуглекислим газом, аргоном та їх сумішами з різними концентраціями сірководню, зафіксували ознаки виразкової корозії (рис. 5).

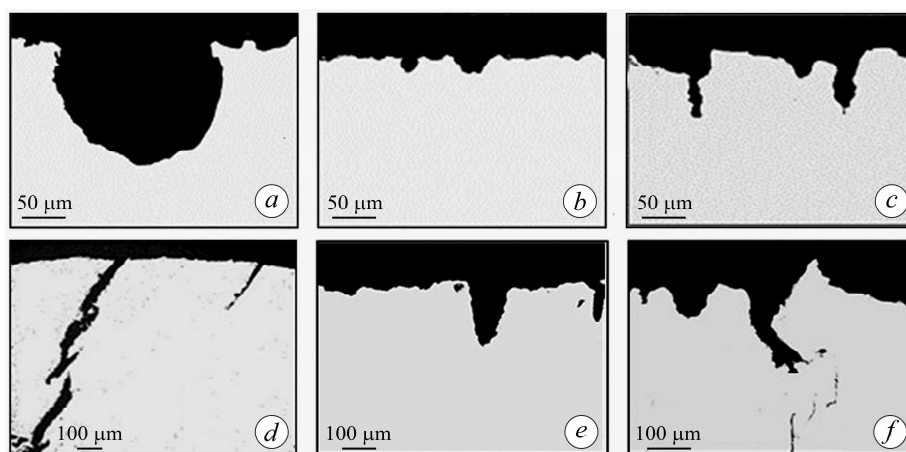


Рис. 5. Мікроструктура корозійних пошкоджень сталі 17Г1С-У в розчинах 5% NaCl + 0,5% CH₃COOH з вуглекислим газом (a–d) та аргоном (e, f) з концентраціями сірководню (mg/dm³): a – 0; b – 100; c – 500; d – 2800; e – 100; f – 500.

Fig. 5. Microstructure of corrosion damage of 17Г1С-У steel in the solutions of 5% NaCl + 0.5% CH₃COOH with carbon dioxide (a–d) and argon (e, f) with concentrations of hydrogen sulfide (mg/dm³): a – 0; b – 100; c – 500; d – 2800; e – 100; f – 500.

У розчині, насиченому вуглекислим газом, на поверхні сталі утворюються виразки заокругленої форми глибиною до 150 μm, за відсутності наводнювання та механічних напружень тріщиноутворення не виявили (рис. 5a). У розчині зі 100 mg/dm³ H₂S поверхня пошкоджена менше, ознаки водневого окрихчення відсутні (рис. 5b). Зі збільшенням його вмісту до 500 mg/dm³ глибина виразок зростає, на їх дні виникають зародки тріщин (рис. 5c). У насиченому сірководнем

розчині утворюються численні підповерхневі тріщини, що є ознакою воднем ініційованого розтріскування (ВІР) сталі (рис. 5d). Характер пошкоджень сталі після витримки у розчині 5% NaCl + 0,5% CH₃COOH з аргонем [13] подібний (рис. 5e, f). Після витримки у середовищі за концентрації 100 mg/dm³ H₂S на поверхні зразків зафіксували виразкову корозію завглибшки до 80...100 μm. За концентрації 500 mg/dm³ і вище глибина виразок збільшується, зароджуються і поширюються тріщини, що свідчить про ВІР.

У розчині, насиченому вуглекислим газом, характеристики міцності сталі на 3...5% нижчі, ніж у повітрі, а параметри пластичності – у 2–2,7 рази, що, імовірно, пов'язано з виразками на поверхні. З введенням у розчин 100 і 500 mg/dm³ H₂S границі міцності і плинності знижуються на ~ 30%, а відносні видовження і звуження – у 3–4,5 рази. У розчині, насиченому сірководнем, характеристики міцності знижуються на 35...45%, а пластичності – у 4,4–4,8 рази, порівняно з насиченим вуглекислим газом (табл. 2). Час до руйнування зразків зі збільшенням концентрації сірководню скорочується у 2,6–4,3 рази.

Таблиця 2. Вплив співвідношення концентрацій сірководню та вуглекислого газу у розчині 5% NaCl + 0,5% CH₃COOH на механічні властивості сталі 17Г1С-У

Середовище	Концентрація H ₂ S, mg/dm ³	σ _{0.2}	σ _B	ψ	δ	Час до руйнування τ, h
		МПа		%		
Повітря	–	460	680	46,6	24,8	108,5
5% NaCl + + 0,5% CH ₃ COOH + + Ar + H ₂ S	0	430	650	19,9	16,9	79,1
	100	444	590	4,9	6,7	42,4
	500	345	460	4,7	6,7	22,1
5% NaCl + + 0,5% CH ₃ COOH + + CO ₂ + H ₂ S	0	449	650	17,4	13,5	74,8
	100	320	472	4,7	4,5	28,2
	500	334	430	3,8	4,2	23,1
5% NaCl + 0,5% CH ₃ COOH + H ₂ S _(sat)		305	362	3,9	3,8	17,2

У хлоридно-ацетатному розчині, насиченому аргонем, параметри міцності сталі на 5...7% нижчі, ніж у повітрі, а пластичності – у 1,2...2 рази. Зі збільшенням концентрації сірководню від 100 mg/dm³ до насичення границя міцності знижується на 10...30%, а відносне видовження – у 2,5–4,5 рази. Тривалість випроб до руйнування зразків скорочується у 1,8–3,5 рази (табл. 2).

У цьому ж розчині, насиченому вуглекислим газом, швидкість корозії сталі нижча, ніж за присутності сірководню, але зростає з часом через відсутність на поверхні захисних карбонатних плівок. Після корозійних випробувань на поверхні сталі утворюються округлі виразки. За одночасного впливу механічних навантажень і корозивного середовища параметри пластичності сталі знижуються у 2–2,7 рази. Параметри міцності зменшуються лише на 3...5%, що, ймовірно, викликано низькою концентрацією абсорбованого водню.

З додаванням у розчин 5% NaCl + 0,5% CH₃COOH + CO₂ сірководню характер корозійних процесів за короткотривалих випроб не змінюється. За довготривалих швидкість корозії, інтенсивність наводнювання і механічні властивості сталі визначає його концентрація. Швидкість корозії сталі на початковому етапі знижується через утворення на поверхні сульфідних плівок. За вмісту 100 mg/dm³

H₂S захисна дія щільних плівок композиції троїліт–макінавіт зберігається впродовж усього часу випробувань (720 h), а за концентрацій 500 і 2800 mg/dm³ – лише 200...250 h, після чого зростає у 2–2,5 рази внаслідок трансформації сульфідів і формування дефектніших поверхневих шарів. Формування сульфідних фаз супроводжується наводнюванням сталі, яке зі збільшенням концентрації сірководню від 100 до 2800 mg/dm³ посилюється від 5 до 18 ppm.

Після корозійних випробувань у розчині за різного співвідношення концентрацій CO₂/H₂S на поверхні сталі виявили виразкову корозію. Зі збільшенням вмісту сірководню від 100 до 2800 mg/dm³ глибина виразок зростає, а за концентрації від 500 mg/dm³ зароджуються і поширюються тріщини, що свідчить про ВР.

За відсутності механічних навантажень швидкість корозії, наводнювання і пошкодження сталі найнижча у розчині з 100 mg/dm³ сірководню. Різко погіршуються її механічні властивості: границі плинності і міцності знижуються на третину, а відносні видовження і звуження – відповідно у 3–4,8 рази. За вищих концентрацій механічні властивості погіршуються, але менше.

У результаті корозії і наводнювання підвищується дефектність поверхневих шарів сталі: утворюються виразки, у кристалічній гратці збільшуються внутрішні напруження і зароджуються тріщини. За прикладення зовнішніх механічних навантажень напруження у кристалічній гратці зростають та розвиваються тріщини, що може призводити до руйнування металу [15].

ВИСНОВКИ

У хлоридно-ацетатному розчині, насиченому вуглекислим газом (рН 2,7), швидкість корозії сталі 17Г1С-У нижча, ніж у присутності сірководню, але зростає з часом через відсутність на поверхні захисних карбонатних плівок. Пластичність сталі знижується у 2–2,7 рази внаслідок локалізації корозії, а міцність несуттєво. З додаванням сірководню у розчин 5% NaCl + 0,5% CH₃COOH + CO₂ характер корозійних процесів за короткотривалих випроб не змінюється. За довготривалих швидкість корозії, наводнювання і механічні властивості сталі визначає концентрація сірководню. Швидкість корозії сталі на початковому етапі довготривалих досліджень знижується внаслідок утворення на поверхні сульфідних плівок. Зі збільшенням концентрації сірководню від 500 до 2800 mg/dm³ і часу випробувань вона зростає у 2–2,5 рази через трансформацію сульфідів і формування дефектних поверхневих шарів. Зі збільшенням вмісту сірководню від 100 до 2800 mg/dm³ сталь абсорбує від 5 до 18 ppm водню. Після випробувань у розчині, що містить вуглекислий газ і сірководень, на її поверхні виявлено виразкову корозію. З підвищенням вмісту сірководню від 100 до 2800 mg/dm³ глибина виразок зростає, за 500 mg/dm³ зароджуються і поширюються тріщини, що свідчить про воднем ініційоване розтріскування. За його концентрації від 100 mg/dm³ до насичення механічні властивості сталі в результаті наводнювання різко погіршуються: границі плинності і міцності знижуються на 30...45%, а відносні видовження і звуження – у 3–4,8 рази.

1. *Effect of temperature and pressure on corrosion behaviour of X65 carbon steel in water-saturated CO₂ transport environments mixed with H₂S* / P. Sui, J. Sun, Y. Hya, H. Liu, M. Zhou, and Y. Zhang // *Int. J. of Greenhouse Gas Control*. – 2018. – **73**. – P. 60–69.
2. *Corrosion behavior of oil sulfide in simulant solution with hydrogen sulfide and carbon dioxide* / Chengqiang Ren, Daoxin Liu, Zhenquan Bai, and Tiehu Li // *Mater. Chemistry and Physics*. – 2005. – **93**. – P. 305–309.
3. *Electrochemical corrosion behavior of 15Cr–6Ni–2Mo stainless steel with/without stress under the coexistence of CO₂ and H₂S* / Xue Hui Zhao, Yaorong Feng, Shawei Tang, and Jianxun Zhang // *Int. J. Electrochem. Sci*. – 2018. – **13**. – P. 6296–6309.

4. *Corrosion-Mechanical Failure of Pipe Steels in Hydrogen Sulfide Environments* / M. Khoma, V. Vynar, M. Chuchman, C. Vasylyv // *Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems*. – Cham: Springer, 2021. – P. 231–239.
DOI:10.1007/978-3-030-58073-5_18
5. *Influence of hydrogen sulfide on the carbon-dioxide corrosion and the mechanical characteristics of high-strength pipe steel* / M. S. Khoma, S. A. Korniy, V. A. Vynar, B. M. Datsko, Yu. Ya. Maksishko, O. V. Dykha, and R. L. Bukliv // *Materials Science*. – 2022. – **57**, № 6. – P. 805–812. DOI:10.1007/s11003-022-00610-0
6. *Атлас родовищ нафти і газу України: у 6-ти т.* / Гол. ред. М. М. Іванюта. – Львів: Центр Європи, 1998. – ISBN 966-7022-04-8.
7. *Contribution of CO₂ on hydrogen evolution and permeation in low alloy steel exposed to H₂S environment* / C. Plennevaux, J. Kittel, M. Fregonese, B. Normand, F. Ropital, F. Grosjean, T. Cassagne // *Electrochem. Communic.* – 2013. – **26**. – P. 17–20.
8. *Zhang G. A., Zeng Y., and Guo X. P.* Electrochemical corrosion behavior of carbon steel under dynamic high pressure H₂S/CO₂ environment // *Corros.Sci.* – 2012. – **65**. – P. 37–47.
9. *Sun W. and Nesic S.* Kinetics of iron sulfide and mixed iron sulfide-carbonate scale precipitation in CO₂/H₂S corrosion // *Corrosion*. – 2006. – P. 06644\1–06644\26.
10. *Review of recent progress in the study of corrosion products of steels in a hydrogen sulphide environment* / X. Wen, P. Bai, B. Luo, S. Zheng, and C. Chen // *Corros. Sci.* – 2018. – **139**. – P. 124–140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2018.05.002>
11. *NACE Standard SP0110-2010. Wet Gas Internal Corrosion Direct Assessment Methodology for Pipelines*. – Houston, TX: NACE, 2010.
12. *Tribo-corrosion of 17Mn1Si steel in chloride acetate environments at the different concentrations of hydrogen sulfide* / Myroslav Khoma, Vasyl Vynar, Chrystyna Vasylyv, Marian Chuchman, Bohdan Datsko, Vasyl Ivashkiv, and Oleksandr Dykha // *J. of Bio- and Tribo-Corrosion*. – 2022. – **8**. – P. 53–62. <https://doi.org/10.1007/s40735-022-00655-3>
13. *Corrosion-electrochemical properties of 17G1SU steel in chloride-acetate solutions with different concentrations of hydrogen sulfide* / M. S. Khoma, V. R. Ivashkiv, N. B. Ratska, B. M. Datsko, M. R. Chuchman // *Materials Science*. – 2021. – **56**, № 4. – P. 544–549.
14. *Effect of sulfides on the hydrogen overvoltage and hydrogenation of U8 steel in chloride-hydrogen-sulfide media* / M. S. Khoma, S. A. Holovei, V. R. Ivashkiv, and Kh. B. Vasylyv // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 6. – P. 761–768.
15. *Dwivedi S. K. and Vishwakarma M.* Hydrogen embrittlement in different materials: A review // *Int. J. of Hydrogen Energy*. – 2018. – **43**. – P. 21603–21616.

Одержано 09.01.2023