

УДК 620.194.3

## КОРОЗІЯ ТА ТРИБОКОРОЗІЯ СТАЛІ 07X16H6 У СІРКОВОДНЕВИХ СЕРЕДОВИЩАХ

М. С. ХОМА<sup>1</sup>, В. А. ВИНАР<sup>1</sup>, Н. Б. РАЦЬКА<sup>1</sup>, І. О. ПАЦАЙ<sup>2</sup>,  
В. І. ПОХМУРСЬКИЙ<sup>1</sup>, Р. М. ЮРКЕВИЧ<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка";

<sup>3</sup> Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

Досліджено вплив концентрації сірководню ( $0 \dots 1500 \text{ mg/dm}^3$ ) у хлоридно-ацетатних розчинах на корозійні процеси, наводнювання та корозійно-механічне зношування сталі 07X16H6. Встановлено, що незалежно від його вмісту корозійна тривкість сталі у цих розчинах значно нижча, ніж у середовищі без сірководню, де вона пасивується. На її поверхні формуються продукти корозії з оксидно-сульфідних сполук, товщина яких зростає з підвищенням концентрації сірководню. Їх верхній шар втрачає суцільність за його вмісту  $1500 \text{ mg/dm}^3$ . Трибокорозійні характеристики сталі за концентрацій  $100$  і  $500 \text{ mg/dm}^3$  змінюються несуттєво, а за  $1000$  і  $1500 \text{ mg/dm}^3$  знижуються на  $\sim 30\%$ . Корозійні процеси визначають корозійно-механічне зношування сталі у середовищі із різним вмістом сірководню, що пов'язано із наводнюванням поверхневих шарів та інтенсивним відновленням однорідних оксидно-сульфідних плівок на поверхні доріжок тертя під час фрикційного контакту.

**Ключові слова:** *сталь 07X16H6, корозія, наводнювання, трибокорозія, хлоридно-ацетатний розчин, сірководень, концентрація.*

The influence of hydrogen sulfide concentration ( $0 \dots 1500 \text{ mg/dm}^3$ ) in chloride-acetate solutions on corrosion processes, hydrogenation and corrosion-mechanical wear of 07X16H6 steel has been studied. It is found that the corrosion resistance of steel in chloride-acetate solutions, regardless of the hydrogen sulfide content, is much lower than in the medium without hydrogen sulfide, in which its passivation is manifested. Corrosion products are formed on the surface of steel, consisting of oxide-sulfide compounds, the thickness of which increases with increasing hydrogen sulfide concentration and at a hydrogen sulfide concentration of  $1500 \text{ mg/dm}^3$  their upper layer loses continuity. The tribocorrosion characteristics of steel at hydrogen sulfide concentrations of  $100$  and  $500 \text{ mg/dm}^3$  do not change significantly, and at  $1000$  and  $1500 \text{ mg/dm}^3$  they decrease by  $\sim 30\%$ . Corrosion processes have a decisive influence on the corrosion and mechanical wear of steel in environments with different hydrogen sulfide content, which is associated with hydrogenation of surface layers and intensive restoration of homogeneous oxide-sulfide films on the surface of friction tracks during frictional contact.

**Keywords:** *steel 07X16H6, corrosion, hydrogenation, tribocorrosion, chloride-acetate solution, hydrogen sulfide, concentration.*

**Вступ.** Надійність і довговічність устаткування у нафтогазовидобувній та переробній промисловостях суттєво залежать від тривкості до корозійно-механічного руйнування, спричиненого сірководнем, який пришвидшує суцільну та виразкову корозію сталей та знижує їх опірність руйнуванню за циклічних навантажень. Крім того, залежно від агресивності середовищ, можливі поверхневе пу-

хиріння або воднем ініційоване розтріскування [1–4]. Інтенсивність корозії посилює не тільки сірководень, а й хлориди. Роботоздатність нафтогазопромислового обладнання поліпшують комплексно, зокрема, застосовуючи різноманітні технологічні методи, наносючи покриття, вживаючи інгібітори корозії тощо [5–7]. Однак так не завжди вдається забезпечити надійну та ефективну роботу вузлів тертя. Тому слід всебічно оцінити та вивчити закономірності впливу сірководню на трибологічні властивості конструкційних сталей, що важливо для підвищення ресурсу нафтогазопереробних агрегатів.

Конструкційні елементи під час тертя в корозивних середовищах працюють за умов трибокорозії, інтенсивність якої визначають фізико-хімічні та механічні процеси на поверхні матеріалів [8]. Тертя змінює чутливість матеріалу до корозії, а корозія – умови тертя, і цей взаємовплив залежить від поверхневих процесів під час фрикційного контакту. Поверхні тертя в агресивних сірководеньмісних середовищах кородують із формуванням сульфідних плівок різного стехіометричного складу та наводнюються, що суттєво впливає на характер зношування і водночас – на довговічність конструкцій. Тому необхідно досліджувати взаємозв'язок корозійних процесів у зоні фрикційного контакту і механічних чинників, що зумовлюють поверхнєве руйнування матеріалів [9–12]. Корозійні характеристики, наводнювання і корозійне розтріскування конструкційних сталей у сірководеньмісних середовищах вивчали досить детально, але результатів про їх трибокорозійні характеристики не так багато.

Тому зосередили увагу на впливі концентрації сірководню у мінералізованих водних середовищах на трибологічні властивості сталі 07X16H6 із урахуванням її корозійної тривкості та наводнювання.

**Методика досліджень.** Випробовували аустенітно-мартенситну сталь 07X16H6 (mass%: 0,07 C;  $\leq 0,8$  Si;  $\leq 0,8$  Mn; 5,3 Ni; 17,0 Cr;  $\leq 0,3$  Cu;  $\leq 0,02$  S;  $\leq 0,035$  P; 0,38 Ti) за температури 20°C у розчині 5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH (pH 2,9) з концентрацією сірководню 0; 100; 500; 1000 та 1500 mg/dm<sup>3</sup> (відхилення складало не більше 10%). Сірководневі розчини готували, пропускаючи газову суміш сірководню та аргону відповідних парціальних тисків крізь робочий розчин. Сірководень одержували гідролізом сульфиду алюмінію, що гарантувало його чистоту. Його вміст у розчині визначали фотоколориметричним методом, використовуючи до 50 mg/dm<sup>3</sup> N,N-диметил-п-фенілендіаміну, та йодометричним – за вищих концентрацій (ГОСТ 22387.2-97).

Методом вакуумної екстракції встановлювали кількість дифузійно активного водню в сталях, що десорбується при 200°C ( $C_{200}$ ), залишкового ( $C_{800}$ ), який десорбується при 800°C, і сумарний їх вміст ( $C_{\Sigma}$ ).

Морфологію і хімічний склад поверхневих шарів сталі досліджували за допомогою сканівного електронного мікроскопа EVO-40XVP (Carl Zeiss) зі системою EDX аналізу INCA ENERGY 350.

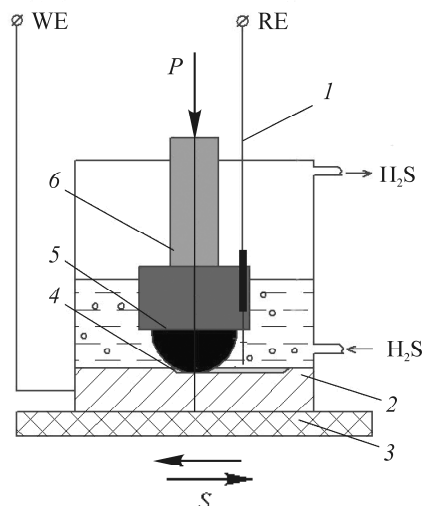
Для трибокорозійних випробувань у розчині сірководню зразок (10×50×2 mm) встановлювали на станині, електрохімічну комірку фіксували, притискаючи до гумового ущільнювача (рис. 1). Суміш сірководню з аргонем заздалегідь пропускали через розчин 2 h. Під час досліджень крізь барботований розчин пропускали газ потрібної концентрації, який відводили з герметичної камери. Для електрохімічних випроб як робочий електрод (WE) використовували зразок, а як електрод порівняння (RE) – хлоридсрібний. Зміну електродного потенціалу під час тертя фіксували потенціостатом ПИ-2МК-10А. Окремо поляризаційні криві знімали на деформованих зразках зі швидкістю розгортання 1 mV/s. Навантаження на контртіло (кулька  $\varnothing$  9 mm з Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 10 N. Втрати матеріалу визначали за профілограмами доріжки тертя. Зміну коефіцієнта тертя фіксували тензодавачами, наклеєними на шток і з'єднаними з комп'ютером через аналогово-цифровий

пристрій. За зворотно-поступального руху реєстрували його значення в різних напрямках і розраховували усереднене  $(\mu + |\mu|)/2$ .

Рис. 1. Схема електрохімічної комірки для дослідження трибокорозії:  
 1 – електрод порівняння (RE); 2 – зразок – робочий електрод (WE); 3 – станина;  
 4 – доріжка тертя; 5 – контртіло (кулька з корунду  $\varnothing 9$  mm); 6 – шток;  
 $P$  – прикладене навантаження;  
 $S$  – переміщення станини.

Fig. 1. Scheme of the electrochemical cell for the study of tribocorrosion:

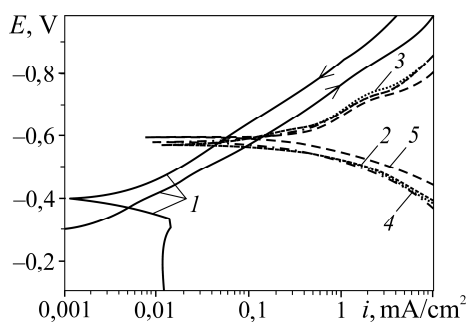
1 – reference electrode (RE);  
 2 – sample – working electrode (WE);  
 3 – bed; 4 – friction track;  
 5 – counter body (corundum ball  $\varnothing 9$  mm);  
 6 – stock;  $P$  – applied load;  
 $S$  – frame movement.



**Результати експерименту та їх обговорення.** Перед випробуваннями корозійну тривкість сталі досліджували методом вольтамперометрії. Встановили, що в хлоридно-ацетатному розчині без сірководню вона пасивується. За потенціалу корозії ( $E_{\text{corr}}$ ) струм повної пасивації дорівнює  $0,012 \text{ mA/cm}^2$ . Однак швидкість корозії визначають повільніші катодні процеси (див. рис. 2 і таблицю).

Рис. 2. Поляризаційні криві сталі 07X16H6 в розчині 5% NaCl + 0,5%  $\text{CH}_3\text{COOH}$  за  $20^\circ\text{C}$ , швидкості розгортки потенціалу  $1 \text{ mV/s}$  та різної концентрації сірководню,  $\text{mg/dm}^3$ : 1 – 0; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 1000; 5 – 1500.

Fig. 2. Polarization curves of 07X16H6 steel in 5% NaCl + 0.5%  $\text{CH}_3\text{COOH}$  solution at  $20^\circ\text{C}$ , scan rate of potential  $1 \text{ mV/s}$  and different concentrations of hydrogen sulfide,  $\text{mg/dm}^3$ : 1 – 0; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 1000; 5 – 1500.



У хлоридно-ацетатному розчині із різним вмістом сірководню корозійна тривкість сталі суттєво нижча, ніж у розчині без нього. Струми корозії зростають від  $0,001$  до  $0,17 \dots 0,182 \text{ mA/cm}^2$ . Виявили, що з додаванням сірководню до розчину 5% NaCl + 0,5%  $\text{CH}_3\text{COOH}$  потенціали корозії сталі зсуваються в бік від'ємніших значень і знаходяться в межах  $-0,55 \dots -0,57 \text{ V}$ , а корозію контролює катодний чинник. Загалом вона протікає за електрохімічно-активного стану поверхні, сталь не пасивується, а на її поверхні формуються поруваті продукти корозії чорного кольору, які можуть містити сульфіді різного хімічного складу. Очевидно, що за таких умов спочатку утворюється макінавіт  $\text{Fe}_{1+x}\text{S}$ , який надалі трансформується в сульфіді з підвищеним вмістом сульфуру із погіршеними захисними властивостями [13, 14].

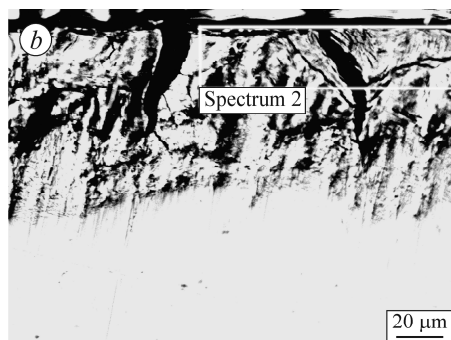
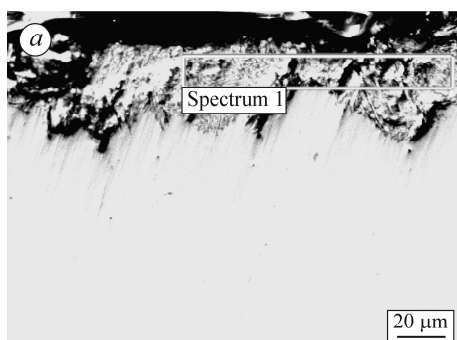
**Електрохімічні показники корозії сталі 07X16Н6 у розчині 5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH з різною концентрацією сірководню**

Концентрація H <sub>2</sub> S, mg/dm <sup>3</sup>	$E_{\text{corr}}$ , V	$i_{\text{corr}}$ , mA/cm <sup>2</sup>
0	-0,21	0,012
100	-0,57	0,182
500	-0,55	0,170
1000	-0,56	0,182
1500	-0,57	0,178

численними розгалуженнями. Хімічний склад цієї зони дещо інший, ніж за менших концентрацій сірководню, зокрема, вміст кисню збільшується до ~ 24 mass%, а сірки – до ~ 18 mass%. У нижній зоні структура однорідна, дрібнодисперсна і без тріщин, її хімічний склад практично такий же, як і за вмісту сірководню 100 і 500 mg/dm<sup>3</sup> (рис. 3). Таким чином, за концентрації сірководню 1500 mg/dm<sup>3</sup> оксидно-сульфідний шар повністю втрачає суцільність через тріщиноутворення [15].

Встановили, що внаслідок корозії упродовж 720 h у розчині 5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH + 100 mg/dm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>S на поверхні сталевих зразків утворюється плівка товщиною 20...30 μm (рис. 3), яка зі зростанням концентрації сірководню до 500 mg/dm<sup>3</sup> збільшується до 40...55 μm. Її хімічний склад суттєво не змінюється, проте у верхній зоні зафіксували локальне розтріскування.

Після витримки зразків у розчині з 1500 mg/dm<sup>3</sup> сірководню товщина оксидно-сульфідного шару збільшується до 60...65 μm. У його верхній зоні виявили глибокі тріщини завширшки до 10 μm із



Element	Spectrum 1		Spectrum 2	
	mass%	at.%	mass%	at.%
O K	12,31	36,43	24,25	47,77
S K	2,03	2,66	18,38	18,44
Cr K	17,80	14,37	4,12	2,55
Fe K	60,26	45,27	36,87	21,25
Ni K	7,60	5,43	16,38	8,98
Total	100	100	100	100

Рис. 3. Металографія поверхневого шару зразків зі сталі 07X16Н6 після випробувань у розчині 5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH із концентрацією сірководню, mg/dm<sup>3</sup>: a – 100; b – 1500 (σ = 0 МПа, τ = 720 h) та їх типовий хімічний склад.

Fig. 3. Metallography of the surface layer of 07X16H6 steel samples after tests in the solution of 5% NaCl + 0.5% CH<sub>3</sub>COOH with a concentration of hydrogen sulfide, mg/dm<sup>3</sup>: a – 100; b – 1500 (σ = 0 MPa, τ = 720 h) and their typical composition.

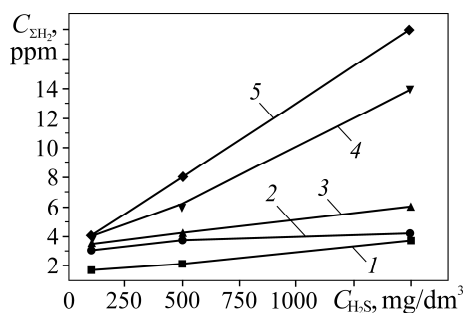
Сірководень у водних розчинах сприяє наводнюванню сталей [2, 4], інтенсивність якого залежить від його концентрації. Методом вакуумної екстракції водню виявили, що об'єм залишкового водню значно менший, ніж дифузійно активного, і становить 15...25% (рис. 4).

Залежності десорбції водню від концентрації H<sub>2</sub>S за різної експозиції свідчать, що після 24 h загальна кількість абсорбованого газу за вмісту сірководню

100 mg/dm<sup>3</sup> досягає 1,69 ppm і зростає до 3,98 ppm. За його концентрації 500 та 1500 mg/dm<sup>3</sup> спочатку кількість абсорбованого водню становить відповідно 2,07 і 3,75 ppm, тобто у 1,2 і 2,2 рази більша, ніж за концентрації 100 mg/dm<sup>3</sup>. Після 120; 200 та 500 h експозицій це співвідношення збільшується і після 720 h зростає за вмісту сірководню 500 mg/dm<sup>3</sup> приблизно вдвічі, а за 1500 mg/dm<sup>3</sup> – у 4,1 рази (рис. 4).

Рис. 4. Залежність концентрації абсорбованого водню в сталі 07X16H6 від вмісту сірководню у розчині 5% NaCl + 0,5% CH<sub>3</sub>COOH за експозиції, h: 1 – 24; 2 – 120; 3 – 200; 4 – 500; 5 – 720.

Fig. 4. Dependence of the concentration of absorbed hydrogen in 07X16H6 steel on the content of hydrogen sulfide in the solution of 5% NaCl + 0.5% CH<sub>3</sub>COOH under exposure, h: 1 – 24; 2 – 120; 3 – 200; 4 – 500; 5 – 720.



Враховуючи, що трибокорозія охоплює низку синергічних взаємодій під час корозійно-електрохімічних процесів та наводнювання за фрикційного контакту, в подальшому можна очікувати змін у трибологічній поведінці матеріалу в сірководеньвмісних середовищах. Аналіз характеру зміни коефіцієнта тертя сталі у повітрі виявив, що в період притирання, який триває приблизно 300 s, він різко знижується від 0,25 до 0,12 (рис. 5a). На етапі стабільного зношування дещо зростає і досягає 0,15...0,17, а ширина доріжок тертя зразків становить близько 310 μm (рис. 5c).

У хлоридно-ацетатному розчині за відсутності сірководню втрати матеріалу дещо збільшуються порівняно з повітрям, зокрема, ширина доріжок тертя зразків – на ~ 40%. Характер зміни коефіцієнта тертя також інший, оскільки за період притирання до 300 s відбувається максимальний знос і він зростає до 0,24, поступово знижуючись до 0,20...0,19 наприкінці випробувань. Електродний потенціал на початку тертя зміщується від -0,33 V у від'ємніший бік на 0,03...0,04 V і залишається практично постійним за фрикційної взаємодії (рис. 5d). Однак упродовж всього часу досліджень він локально змінюється на ~ 10 mV, що свідчить про утворення та руйнування вторинних структур. Після розвантаження контактної пари зміщення потенціалу на 60 mV за 250 s у бік додатних значень пов'язано із пасиваційними процесами на активованих тертям ділянках.

Під час тертя у хлоридно-ацетатному розчині ширина доріжок тертя зразків за вмісту сірководню 100 і 500 mg/dm<sup>3</sup> практично така ж, як без нього, а за концентрації 1000 і 1500 mg/dm<sup>3</sup> зростає на 28...32% (рис. 5c). З підвищенням вмісту сірководню від 100 до 1000 mg/dm<sup>3</sup> коефіцієнт тертя змінюється плавно, зокрема, за концентрації 100 mg/dm<sup>3</sup> його значення за час припрацювання 300 s знижуються від 0,21 до 0,15, а на етапі стабільного тертя зростають приблизно до 0,17. За вмісту сірководню 500 і 1000 mg/dm<sup>3</sup> він змінюється від 0,19...0,21 до 0,15...0,16. На початку випробувань (до 50 s) його значення знаходяться в межах 0,21...0,24 (рис. 5a, b), а з їх тривалістю через взаємодію сірководеньвмісного середовища з поверхнею змінюється природа вторинних структур і він зменшується на 20...25%.

Характер зміни електродних потенціалів під час тертя зразків сталі у середовищі з різною концентрацією сірководню подібний (рис. 5d). На початку фрикційної взаємодії, залежно від часу притирання, вони зміщуються на ~ 0,04 V у від'ємний бік і за стабільного тертя залишаються практично постійними (-0,47 V

за вмісту сірководню  $100 \text{ mg/dm}^3$ ,  $-0,52$  – за  $500$ ,  $-0,55$  – за  $1000$  і  $1500 \text{ mg/dm}^3$ ). Це свідчить про інтенсифікацію анодних реакцій, які, імовірно, відбуваються за максимальних струмів анодного окиснення і контролюються дифузійними процесами [16].

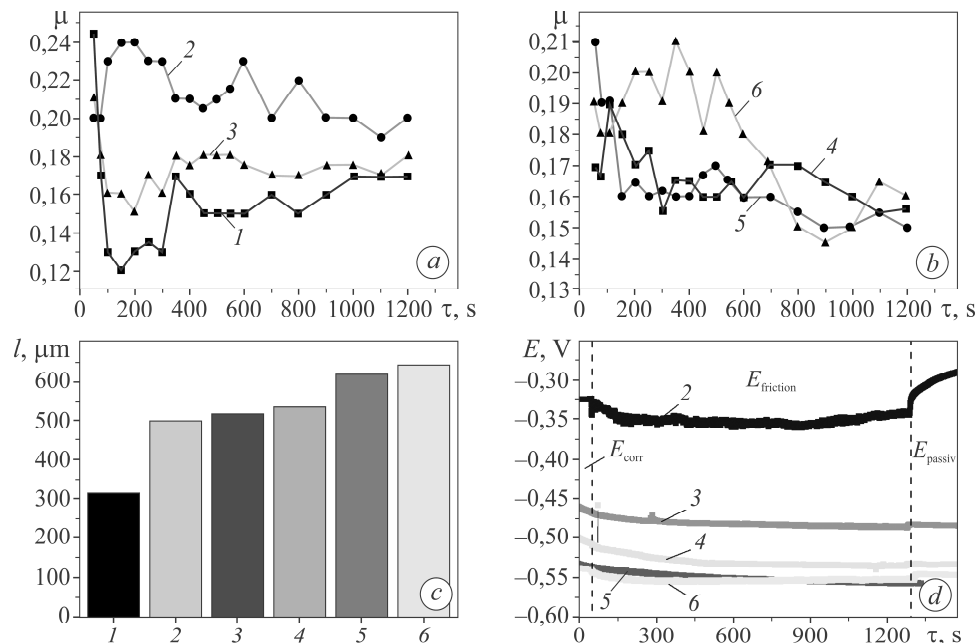


Рис. 5. Трибологічні характеристики сталі 07X16H6 у повітрі (1) і в розчині 5% NaCl + 0,5%  $\text{CH}_3\text{COOH}$  без сірководню (2), із його концентрацією  $100$  (3),  $500$  (4),  $1000$  (5) і  $1500 \text{ mg/dm}^3$  (6):  
*a, b* – коефіцієнт тертя; *c* – ширина доріжки зносу;  
*d* – зміна електродного потенціалу під час тертя.

Fig. 5. Tribological characteristics of 07X16H6 steel in air (1) and in the solution of 5% NaCl + 0.5%  $\text{CH}_3\text{COOH}$  without hydrogen sulfide (2), with its concentration  $100$  (3),  $500$  (4),  $1000$  (5) and  $1500 \text{ mg/dm}^3$  (6):  
*c* – width of the wear track; *d* – change of electrode potential during steel friction.

Аналіз топографії поверхнь доріжок тертя зразків засвідчив, що у повітрі основну роль відіграють втомні процеси, оскільки на значній площі контактних поверхнь виявили сліди мікрорізання та частинки, сформовані внаслідок контактної взаємодії (рис. 6*a*).

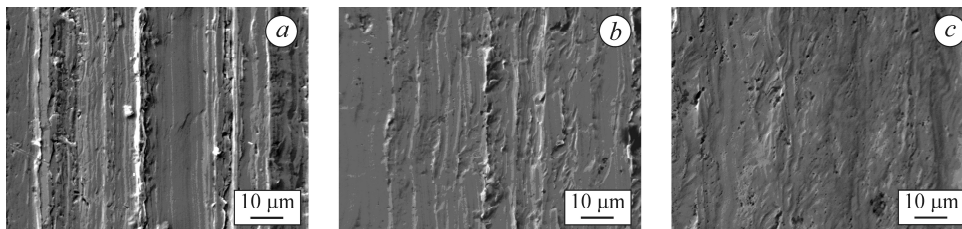


Рис. 6. Топографія поверхні тертя сталі 07X16H6 у повітрі (а), хлоридно-ацетатному розчині без сірководню (b) і з його концентрацією  $1500 \text{ mg/dm}^3$  (c).

Fig. 6. Microstructure of the friction surface of 07X16H6 steel in air (a), chloride-acetate solution without hydrogen sulfide (b) and with its concentration of  $1500 \text{ mg/dm}^3$  (c).

Після тертя у хлоридно-ацетатному розчині без сірководню на їх поверхнях зафіксували пластичну деформацію і окремі ділянки оксидів, що вказує на неоднорідність поверхневих плівок (рис. 6b). Пришвидшене окиснення поверхні під час тертя сприяє незначному викришуванню зерен. Сталь за цих умов зношується за змішаним механізмом – трибохімічним (окиснювальним) і абразивним [17, 18]. У середовищі зі сірководнем на доріжках тертя сталь пластично деформується та рівномірно зношується по всій площі контакту. За його концентрації  $1500 \text{ mg/dm}^3$  виявили дрібні виразки, ймовірно, через наводнювання поверхневого шару, проте слідів крихкого руйнування не було (рис. 6c).

Отже, у хлоридно-ацетатних середовищах опір корозійно-механічному зношуванню сталі 07X16H6 поступово падає зі зростанням концентрації сірководню. Визначально на трибохімічний механізм зношування впливають корозійні процеси і наводнювання. За вмісту сірководню  $100$  і  $500 \text{ mg/dm}^3$  воно незначне, що можна пояснити більшою однорідністю оксидно-сульфідних плівок. У корозивному середовищі за його вмісту  $1000$  і  $1500 \text{ mg/dm}^3$  вплив водню найвідчутніший. Внаслідок зростання концентрації сірководню ( $\geq 1000 \text{ mg/dm}^3$ ) характеристики опірності зношуванню сталі знижуються. Цим можна пояснити збільшення осциляцій коефіцієнта тертя і незначну різницю між середніми його значеннями, і водночас – суттєве зростання зносу в середовищах з меншою концентрацією сірководню. Окрім цього, під час фрикційної взаємодії оксидно-сульфідні плівки інтенсивно відновлюються і частково перекривають поодинокі виразки. Їх однорідність зменшується, ймовірно, внаслідок формування сульфідів, кристалічна решітка яких має більшу кількість дефектів, що і сприяє локалізації корозії [2].

#### ВИСНОВКИ

Сталь 07X16H6 у хлоридно-ацетатному розчині за відсутності сірководню пасивується. За його концентрацій  $100$ ;  $500$ ;  $1000$  і  $1500 \text{ mg/dm}^3$  у розчині  $5\% \text{ NaCl} + 0,5\% \text{ CH}_3\text{COOH}$  корозія протікає за електрохімічно-активного стану поверхні і корозійна тривкість на  $\sim 30\%$  нижча, ніж у середовищі без нього. На поверхні сталі формуються продукти корозії, що складаються з оксидно-сульфідних сполук, товщина яких зростає зі збільшенням концентрації сірководню і за його вмісту  $1500 \text{ mg/dm}^3$  верхній шар втрачає суцільність через розтріскування. За концентрації сірководню  $100$ ;  $500$  та  $1500 \text{ mg/dm}^3$  сталь абсорбує, відповідно,  $4,2$ ;  $8$  та  $17,5 \text{ ppm}$  водню, в якому  $75\ldots 85\%$  дифузійно рухливого.

Встановлено, що у результаті корозійно-механічного зношування сталі у розчині  $5\% \text{ NaCl} + 0,5\% \text{ CH}_3\text{COOH}$  з різним вмістом сірководню домінує рівномірне корозійно-механічне зношування без суттєвих локальних пошкоджень. Адгезійно-когезійна взаємодія між вторинними структурами і поверхневими шарами послаблюється, що проявляється у зниженні коефіцієнта тертя. Характер зміни електродних потенціалів під час трибокорозії вказує, що у хлоридно-ацетатному розчині інтенсивніші процеси утворення та руйнування вторинних структур порівняно зі сірководеньвмісним.

Трибокорозійні процеси зменшують опірність зношуванню сталі 07X16H6 внаслідок активації корозії кислим розчином на  $\sim 40\%$ . Сірководень незначно впливає на ширину доріжок тертя зразків за вмісту  $100$  і за  $500 \text{ mg/dm}^3$ , а за вищого вона зростає на  $\sim 30\%$ .

1. Khoma M. S., Vasylyv K. 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>.
2. *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, and B. M. Datsko // *Materials Science*. – 2021. – **56**, № 4. – P. 544–549. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00462-0>.

3. *Corrosion-mechanical failure of pipe steels in hydrogen sulfide environments* / M. Khoma, V. Vynar, M. Chuchman, and C. Vasylyv // *Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems. Lecture Notes in Civil Engineering*. – Springer, 2021. – **102**. – P. 231–239. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58073-5\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58073-5_18).
4. *Касаткин Г. Н. Водород в конструкционных сталях*. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003. – 336 с.
5. *Ropyak L. and Ostapovych V. Optimization of process parameters of chrome plating for providing quality indicators of reciprocating pumps parts* // *Eastern-Europ. J. of Enterprise Technol.* – 2016. – **2**, № 5. – P. 50–62. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65719>.
6. *Corrosion protection of carbon steel by a composition based on natural polysaccharide* / S. A. Korniy, I. M. Zin, M. B. Tymus, O. P. Khlopyk, and M.-O. M. Danyliak // *Materials Science*. – 2021. – **56**, № 5. – P. 602–607.
7. *Чернова М. Є. Полімерно-композиційні матеріали для елементів бурильної колони* // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2013. – № 1. – С. 153–161.
8. *Landolt D. and Mischler S. Tribocorrosion of Passive Metals and Alloys*. – UK: Woodhead Publishing Cambridge, 2011. – 584 p.
9. *López-Ortega A., Arana J. L., and Bayón R. Tribocorrosion of passive materials: a review on test procedures and standards* // *Int. J. of Corr.* – 2018. – P. 1–24.
10. *Wood R. J. K. Tribo-corrosion of coatings: a review* // *J. of Physics D: Appl. Phys.* – 2007. – **40**, № 18. – P. 5502–5521.
11. *Tribocorrosion of stainless steel in sulfuric acid: Identification of corrosion-wear components and effect of contact area* / N. Diomidis, J.-P. Celis, P. Ponthiaux, F. Wenger // *Wear*. – 2010. – **269**, № 1–2. – P. 93–103.
12. *Vynar V. A., Dovhnyk V. M., and Student M. M. Methodical specific features of tribocorrosion investigations* // *Materials Science*. – 2011. – **46**, № 5. – P. 633–639. <https://doi.org/10.1007/s11003-011-9334-4>.
13. *Effects of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S on corrosion of martensitic steels in brines at low temperature* / Ruishu Feng, Justin R. Beck, Derek M. Hall, Aysel Buyuksagis, Margaret Ziomek-Moroz, and Serguei N. Lvov // *Corrosion*. – 2018. – **74**, № 3. – P. 276–287. <https://doi.org/10.5006/2406>.
14. *Abelev E., Ramanarayanan T. A., and Bernasek S. L. Iron corrosion in CO<sub>2</sub>/brine at low H<sub>2</sub>S concentrations: An electrochemical and surface science study* // *J. of the Electrochem. Society*. – 2009. – **156**, № 9. – P. C331–C339.
15. *Dwivedi S. K. and Vishwakarma M. Hydrogen embrittlement in different materials: A review* // *Int. J. of Hydrogen Energy*. – 2018. – **43**. – P. 21603–21616.
16. *Похмурський В. І., Хома М. С. Корозійна втома металів та сплавів*. – Львів: Сполом, 2008. – 304 с.
17. *Jemmelly P., Mischler S., and Landolt D. Tribocorrosion behaviour of Fe–17Cr stainless steel in acid and alkaline solutions* // *Tribology Int.* – 1999. – **32**. – P. 295–303.
18. *Determination of the mechanism of tribocorrosion of D16T alloy according to the electrode potential* / V. A. Vynar, V. I. Pokhmurs'kyi, I. M. Zin', Kh. B. Vasylyv, and O. P. Khlopyk // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 5. – P. 717–723. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0128-9>.

Одержано 22.02.2022