

<https://doi.org/DOI:10.30857/1813-6796.2020.4.11>

УДК544.653.2:  
620.194

НИРКОВА Л. І.<sup>1</sup>, ГОНЧАРЕНКО Л. В.<sup>1</sup>, БОРИСЕНКО Ю. В.<sup>2</sup>,  
ХАРЧЕНКО Ю. О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України

<sup>2</sup>Київський національний університет технологій та дизайну

## ОСОБЛИВОСТІ ЛОКАЛЬНОЇ КОРОЗІЇ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ТРУБНОЇ СТАЛІ Х70, ОБУМОВЛЕНОЇ ЙОГО ЕЛЕКТРОХІМІЧНОЮ ГЕТЕРОГЕННІСТЮ

**Мета.** Встановлення впливу хімічного складу і структури на локальну корозію зварного з'єднання трубної сталі Х70 в умовах, що моделюють експлуатаційні, та визначення основних чинників корозії.

**Методика.** Застосовували стандартні методи: потенціометрія, метод поляризаційних кривих, дослідження опірності корозії при постійній деформації, профілометрія, метод оптичної металографії.

**Результати.** Вивчено електрохімічну гетерогенність зварного з'єднання (на прикладі сталі Х70) з заводським зварним швом. Встановлено, що в зварному шві цього з'єднання децю менший вміст порівняно з основним металом таких елементів: Al (0,025 % і 0,02 %, відповідно) та Nb (0,033 % і 0,058 %, відповідно), але більший вміст Mo і Cr. Структура основного металу – феритобейнітна, невеликі перлітні утворення, структура шва різномірна, містить дисперсний голчатий, зернограничний полігональний, доевтектоїдний ферит та окремі ділянки пластинчатого фериту. Зроблено висновок, що в дослідженому зварному з'єднанні більшу електрохімічну активність будь-якої зони можна зв'язати з меншим вмістом в ній легуючих елементів або особливостями мікроструктури. За результатами електрохімічних та прискорених корозійно-механічних випробувань в умовах, що моделюють експлуатаційні, встановлено, що вирішальним чинником для ініціювання локальної корозії зварних з'єднань є корозійно-активне середовище і умови перебігу корозійного процесу, зокрема – тонкоплівкова корозія в двофазному середовищі (вуглекислий газ-вода).

**Наукова новизна.** За результатами комплексного дослідження отримані нові дані щодо впливу хімічного складу та структури зон зварного з'єднання сталі Х70 з заводським поздовжнім зварним швом на її схильність до локального корозійного руйнування. Встановлено, більш висока електрохімічна активність будь-якої зони зварного з'єднання може бути обумовлена меншим вмістом в ній легуючих добавок (це стосується металу зварного шва) та/або особливостями мікроструктури (стосовно металу зварного шва та зони термічного впливу).

**Практична значимість.** Розроблено та обґрунтовано методичний підхід до дослідження локальної корозії зварних з'єднань в умовах, що моделюють експлуатаційні умови, на прикладі зварного з'єднання зі сталі Х70. Розроблено лабораторний стенд для досліджень. Встановлено, що вирішальним чинником для ініціювання локальної корозії зварних з'єднань є корозійно-активне середовище і умови перебігу корозійного процесу, зокрема – тонкоплівкова корозія в двофазному середовищі (вуглекислий газ-вода).

**Ключові слова:** трубна сталь Х70, потенціометрія, метод поляризаційних кривих, катодний потенціал, електрохімічна корозія, корозія під напруженням.

**Вступ.** Механічні властивості маловуглецевих або середньовуглецевих конструкційних сталей можна значно поліпшити за рахунок введення легуючих добавок. У деяких випадках їх невелика кількість, сприяючи покращенню механічних властивостей сталі, може підвищити й корозійну тривкість [1].

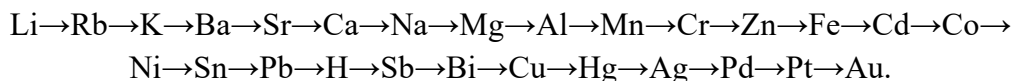
До таких добавок відносяться вуглець, кремній, мідь, хром, фосфор, сірка, марганець, молібден, нікель титан і ніобій. Імовірно, що підвищення корозійної тривкості при легуванні залежить від природи і кількості легуючих елементів, а також, причому, навіть більшою мірою, від корозивності середовища. Такі добавки, як мідь або хром, в низьколегованих

сталях можуть впливати на швидкість корозії, зміщуючи потенціал поверхні в бік більш позитивних значень, і тим самим полегшуючі пасивацію [2], що підтверджується результатами електрохімічних вимірів [3].

Однак, ефекти, обумовлені додаванням різних легуючих елементів, не адитивні. Практичний вплив легуючих добавок на корозійну стійкість сталі можна узагальнити таким чином:

- мідь при підвищенні її вмісту близько до 0,2 % помітно підвищує корозійну стійкість, подальше збільшення її вмісту майже не дає ефекту;
- фосфор, наприклад, в комбінації з міддю, також сприяє підвищенню корозійної стійкості, однак, вміст фосфору вище 0,10 % знижує механічні властивості сталі;
- хром в невеликих кількостях суттєво підвищує корозійну стійкість завдяки своїм пасивуючим властивостям;
- нікель, хоча дещо й знижує швидкість корозії, не чинить такого впливу, як вищеназвані три елементи;
- марганець, можливо, може бути дуже ефективним для середовищ, що містять хлориди, але механізм його впливу поки не з'ясовано;
- кремній ефективний приблизно у такій же мірі, як і марганець, але дані про його властивості суперечливі;
- молібден в низьколегованих сталях використовувався рідко, але може виявитися таким же ефективним, як мідь.

Згідно з електрохімічним рядом напруг (рядом активності металів) – послідовністю елементів в порядку збільшення їх стандартних потенціалів окиснення, який застосовується для порівняння активності металів, найпоширеніші елементи розташовуються таким чином [4]:



Тобто, чим менше значення має електродний потенціал металу, тим він хімічно активніше, легше окислюється і важче відновлюється зі своїх іонів.

Нижче наведено потенціали окиснення деяких металів, які застосовуються як легуючі добавки до сталі. Як видно з табл. 1, потенціали майже всіх легуючих елементів, крім нікелю і міді, більш від'ємні, ніж потенціал заліза. Їх введення до складу сталі може сприяти зміщенню потенціалу в негативний бік. При цьому їх висока хімічна активність поєднується з виключно високою корозійною стійкістю, що пояснюється наявністю на поверхні тонкої практично бездефектної плівки оксидів.

**Постановка завдання.** Зазвичай, у зварному з'єднанні, метал шва є більш легованим порівняно із основним металом. Це необхідно для того, щоб запобігти утворенню гальванічної пари між швом та основним металом, в якій внаслідок меншої площі шов працює як катод, та його переважному руйнуванню при контакті з корозивним середовищем. Але в практиці експлуатації відомі випадки переважного руйнування зварних швів. Треба зауважити, що таке руйнування зварного з'єднання властиве, в основному, для внутрішньої поверхні. Поставлено завдання дослідити електрохімічну гетерогенність та вплив хімічного складу і структури металу на локальну корозію зварних з'єднань на прикладі зварного з'єднання трубної сталі Х70 з заводським зварним швом.

Таблиця 1

Потенціали окиснення деяких металів

Електрод	Потенціал, В	Електрод	Потенціал, В
$Al^{3+} / Al$ [5]	-1,7	$Cr^{2+} / Cr$	-0,91
$Ti^{2+} / Ti$ [6]	-1,6	$Fe^{2+} / Fe$	-0,44
$V^{2+} / V$ [7]	-1,19	$Ni^{2+} / Ni$	-0,24
$Mn^{2+} / Mn$	-1,18	$Mo^{3+} / Mo$ [9]	-0,20
$Nb^{2+} / Nb$ [8]	-0,96	$Cu^{2+} / Cu$	0,34

**Методика експериментів.** Дослідження проводили на зварному з'єднанні трубної сталі X70 із заводським зварним швом, виконаним автоматичним дуговим зварюванням, рис. 1.

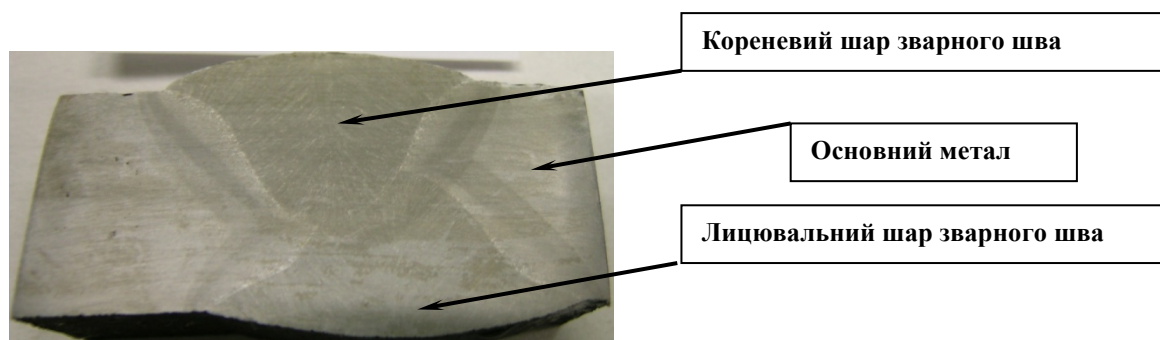


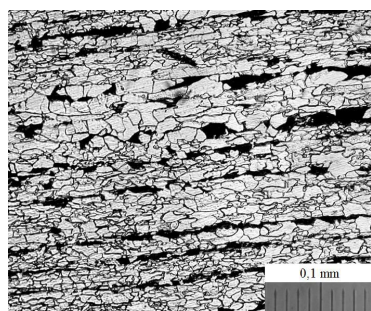
Рис. 1. Фото зразка досліджуваного зварного з'єднання зі сталі X70

Хімічний склад зон зварного з'єднання наведено в табл. 2, їх мікроструктуру – на рис. 2.

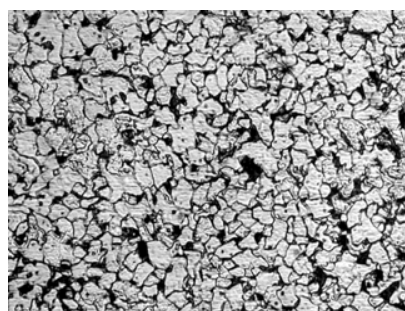
Таблиця 2

Хімічний склад основного металу та зварного шва досліджуваного зварного з'єднання зі сталі X70

Зона зварного з'єднання	C	Mn	Si	S	P	Al	Ni	Mo	Ti	V	Nb	Cr
Основний метал	0,098	1,68	0,28	0,007	0,010	0,025	0,02	0,31	0,001	0,01	0,058	0,01
Шов (внутр.)	0,090	1,65	0,34	0,013	0,013	0,02	0,04	0,36	0,001	0,01	0,033	0,03
Шов (зовн.)	0,089	1,65	0,33	0,015	0,013	0,02	0,04	0,38	0,001	0,01	0,034	0,03



a



б



в

Рис. 2. Мікроструктура зон зварного з'єднання сталі X70:

a – основний метал, б – кореневий шар зварного шва,  $\times 400$ ; в – облицювальний шар зварного шва,  $\times 400$

Для потенціометричних досліджень робочим розчином обирали розчин складу 0,1 М  $\text{NaHCO}_3$  + 0,001 М  $\text{NaCl}$ . Поляризаційні криві знімали в потенціодинамічному режимі за триелектродною схемою зі швидкістю сканування потенціалу  $5 \times 10^{-4}$  В/с. Застосовували притискну комірку, площа зразка становила 0,29  $\text{cm}^2$ . Робочими електродами слугував зразок зварного з'єднання трубною сталі Х70, електродом порівняння – хлоридсрібний електрод, допоміжним – платиновий. З поляризаційних кривих визначені та обчислені потенціал корозії, струм в області активного анодного розчинення, нахил анодної поляризаційної кривої, граничний дифузійний струм, потенціал початку виділення водню.

Опірність корозії під напруженням вивчали постійній деформації, яка дорівнювала  $0,95\sigma_T$  ( $\sigma_T$  - границя текучості сталі Х70, яка рівна 535 МПа) на прямокутних зразках розміром  $200 \times 20 \times 10$  мм, виготовлених зі зварного з'єднання сталі Х70. Зразки навантажували за чотириточковою схемою вигину в центральній зоні згідно з ГОСТ 9.901.2 (пункт 3.4.1.4) [10]. Стрілу вигину обчислювали за формулою:

$$y = \frac{\sigma(3H^2 - 4A^2)}{12Et} \quad (1)$$

де  $\sigma$  - величина заданих напружень, МПа;  $E$  - модуль пружності,  $\text{H/m}^2$ ;  $t$  - товщина зразка, м;  $H$  - відстань між зовнішніми опорами, м;  $A$  - відстань між зовнішніми та внутрішніми опорами, м.

Дослідження проводили у розчині 3 %  $\text{NaCl}$ . Умови випробувань та їх тривалість описані нижче. Після корозійно-механічних випробувань проводили металографічні дослідження зразків.

**Результати дослідження.** Дослідження електрохімічними методами впливу хімічного складу різних зон зварного з'єднання трубною сталі Х70 на особливості анодної поведінки. Результати електрохімічних досліджень, рис. 3, показали, що в цьому зварному з'єднанні більшу активність проявляв зварний шов. Майже всі електрохімічні характеристики, за виключенням нахилу анодної поляризаційної кривої (який є меншим для основного металу), вказують на можливість переважного руйнування зварного шва, а саме: потенціал корозії зварного шва від'ємніше, ніж основного металу і становить -0,541 В та -0,316 В, відповідно; більші значення струму анодного розчинення металу шва ( $4,25$  та  $7,5 \times 10^{-4}$   $\text{A/m}^2$ , відповідно) та граничного дифузійного струму ( $0,27$  і  $0,17$   $\text{A/m}^2$ ), менш від'ємний потенціал виділення водню на ЗЗШ (-0,74 В і -0,85 В), відповідно, рис. 3, табл. 3.

З аналізу хімічного складу та мікроструктури (табл. 2 та рис. 2) встановлено, що в зварному шві цього з'єднання дещо менший вміст порівняно з основним металом таких елементів: Al (0,025 % і 0,02 %, відповідно) та Nb (0,033 % і 0,058 %, відповідно), але більший вміст Mo і Cr. Структура ОМ – ферито-бейнітна, невеликі перлітні утворення, структура шва різномірна, містить дисперсний голчатий, зернограничний полігональний, доєвтектоїдний ферит та окремі ділянки пластинчатого фериту, рис. 2.

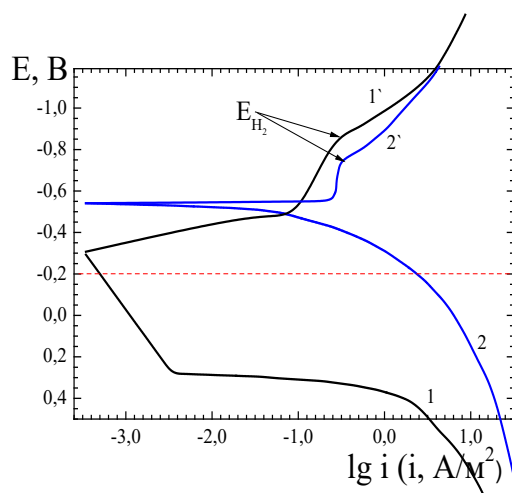


Рис. 3. Поляризаційні криві основного металу сталі X70 та зварного шва у розчині 0,1 М NaHCO<sub>3</sub> + 0,001М NaCl: 1 – основний метал; 2 – метал шва

Таблиця 3

**Електрохімічні характеристики різних зон зварного з'єднання сталі X70 у розчині 0,1 М NaHCO<sub>3</sub> + 0,001М NaCl**

Марка сталі	Зона ЗЗ	$E_k$ , В	$b_a$ , В	Електрохімічні характеристики процесів			
				анодного		катодного	
				$E^*$ , В	$i$ , А/м <sup>2</sup>	$i_d$ , А/м <sup>2</sup>	$E_{H_2}$ , В
X70	ОМ	-0,316	0,029	-0,20	$4,9 \times 10^{-4}$	0,2	-0,85
	ЗШ	-0,541	0,089		2,3	0,3	-0,74

*ОМ – основний метал; ЗШ - зварний шов.*  
 \*Потенціал в області активного анодного розчинення, за якого порівнювали струми анодного розчинення різних зон зварного з'єднання в активній області.

Таким чином, на електрохімічну гетерогенність зварного з'єднання впливає різниця вмісту легуючих елементів (Al, Nb, Mo та Cr) у складі основного металу та зварного шва, залежно від чого, локальні корозійні пошкодження можуть розвиватися у металі шва. Крім того, електрохімічна активність зварного шва може бути обумовлена присутністю різних структур.

Дослідження методами профілометрії та іншими методами локальної корозії зварних з'єднань трубної сталі в умовах, що моделюють експлуатаційні. Природний газ, що транспортується по магістральним трубопроводам, є не корозійно-активним. Але потрапляння в газове середовище корозійно-активних речовин та механічних домішок, наприклад води, вуглецевого газу, сірководню, може сприяти перебігу корозійних процесів на внутрішній поверхні трубопроводу. Газовий простір в трубопроводі може бути насичений парами рідких вуглеводнів та вологи, яка містить кисень. Наявність лише  $10^{-4}$  об'ємних частин кисню у газовій суміші може збільшити швидкість корозії в присутності CO<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>S [11]. Найбільш пересиченими є шари, що прилягають до стінки трубопроводу, оскільки останні охолоджуються оточуючим середовищем. В таких умовах на внутрішній поверхні трубопроводу конденсуються пари води та леткі вуглеводні, які містять кисень [12]. Стікаючи до нижньої твірної трубопроводу, обидві рідини, що утворилися, інтенсивно перемішуються. Таким чином, на внутрішній поверхні стінки труби безперервно змінюється

склад корозійного середовища, яке є двофазним (вуглеводень + вода) і містить кисень [12]. Сконденсована волога, накопичуючись в нижній частині труби, має властивості мінералізованого середовища, що підвищує агресивність конденсату.

Таблиця 4

**Особливості хімічного складу та структури зварного з'єднання сталі X70**

Марка сталі, зона 33		Характеристики поведінки					
		$E_{\kappa}$ , В	$E^*$ , В	$i$ , А/м <sup>2</sup>	Вміст легуючих добавок		Структура
X70	Основ- ний метал	-0,316	-0,30	$7,5 \times 10^{-4}$	0,025 Al 0,058 Nb	0,28 Si 0,01 P 0,31 Mo 0,02 Ni 0,01 Cr	Ферито-перлітна, Бал зерна 9-10
	Зварний шов	-0,541		4,25	0,02 Al 0,033 Nb	0,34 Si 0,013 P 0,36 Mo 0,04 Ni 0,03 Cr	Дисперсний голчатий ферит, з прошарками зернограничного полігонального, доевтектоїдного фериту

Наявність неполярної фази – вуглеводню сприяє більш швидкому перенесенню кисню через тонкі шари до поверхні кородуючого металу. Розчинність кисню у вуглеводнях у 5-10 разів більша ніж у воді, тому в процесі дифузії частина розчиненого кисню переходить з фази рідких вуглеводнів у водну фазу, внаслідок чого в тонкій плівці сконденсованої вологи підтримується його висока концентрація.

Одним з чинників, який прискорює корозію, є рух корозивного середовища. Частина присутніх у водній фазі механічних домішок (карбонатів і сульфідів заліза, піску і глини) потрапляє в обертові краплі води і сприяє періодичному гідроерозійному пошкодженню захисної плівки в нижній частині труби. Так забезпечується постійне функціонування гальванічної макропарі оголений метал – труба, вкрита продуктами корозії. Найбільш небезпечним корозійним пошкодженням є корозійні виразки, утворення яких може привести до розвитку наскрізних пошкоджень. Виразки виникають на неоднорідностях, зокрема, на зварних швах. Часто виразки розвиваються уздовж твірної, на нижньому півколі труби. Осадження продуктів корозії заліза також сприяє утворенню виразок, особливо на протяжних горизонтальних ділянках.

Ураховуючи вищезазначене, розроблено методичний підхід до дослідження внутрішньої локальної корозії зварного з'єднання трубної сталі X70. Змодельовані умови, що відтворюють умови внутрішньої корозії, та розроблено лабораторну установку, яка забезпечувала рухомий потік водного середовища. Для відтворення напруженого стану стінки труби на зразки задавали постійну деформацію. Моделювання впливу двофазного середовища (вуглеводень + вода) проводили таким чином. На поверхню зразків наносили шар індустриального масла та витримували впродовж 24 годин для формування захисного шару, потім випробовували в рухомому потоці 3 % NaCl впродовж різного часу – 400 та 1500 годин. Фотографії зовнішнього вигляду зразків до та після корозійних випробувань наведено на рис. 4.

Під час корозійних випробувань на поверхні зразків утворився товстий шар продуктів корозії бурого кольору, щільно прилягаючий до поверхні. Після видалення продуктів корозії за результатами візуального огляду встановлено, що поверхня зазнала суцільної нерівномірної корозії, виявлені корозійні плями та виразки різної глибини. Методом профілометрії визначали глибину цих ушкоджень по ширині і довжині зразка в області основного металу з шагом 5 мм та в області зварного шва – через 2 мм. За результатами вимірювань глибини корозійних руйнувань будували профілограми, які представлені на рис. 5.

Для кількісної оцінки обчислювали середню глибину корозійних ушкоджень основного металу (ОМ) та зварного шва (ЗШ) [13] з урахуванням загальної кількості точок вимірювань за формулами:

$$h_{OM}^{сер} = \frac{\sum h_{OM}}{N_{OM}}, \quad (2)$$

$$h_{ЗШ}^{сер} = \frac{\sum h_{ЗШ}}{N_{ЗШ}}, \quad (3)$$

де  $\sum h_{OM}$  - сумарна глибина корозійних ушкоджень основного металу, мм;  
 $\sum h_{ЗШ}$  - сумарна глибина корозійних ушкоджень зварного шва, мм;  
 $N_{OM}$  - кількість точок вимірювань глибини корозійних ушкоджень основного металу;  
 $N_{ЗШ}$  - кількість точок вимірювань глибини корозійних ушкоджень зварного шва.

Корозійну стійкість зварного шва та основного металу оцінювали за показниками:

- середня глибина корозійних руйнувань ОМ ( $h_{OM}^{сер}$ ), металу ЗШ ( $h_{ЗШ}^{сер}$ ), мм;
- швидкість корозії ОМ ( $\Pi_{OM}$ ) та металу ЗШ ( $\Pi_{ЗШ}$ ), мм/год;
- відношення швидкості корозії металу ЗШ до швидкості корозії ОМ ( $\frac{\Pi_{ЗШ}}{\Pi_{OM}}$ ).

Швидкість корозії ОМ і металу ЗШ обчислювали за формулами:

$$\Pi_{OM} = h_{OM}^{сер} \frac{365}{\tau}, \quad (4)$$

$$\Pi_{ЗШ} = h_{ЗШ}^{сер} \frac{365}{\tau}, \quad (5)$$

де  $\tau$  – тривалість випробувань, доби; 365 – кількість діб у році.

Результати оцінювання корозійної стійкості досліджених зразків зварних з'єднань наведено в табл. 5.

Металографічним методом уточнювали розміри корозійних уражень. Встановлено, що на поверхні зварних з'єднань утворилися корозійні плями та виразки. Ступінь пошкоджень поверхні основного металу та металу шва досліджених зварних з'єднань в деякій мірі відрізняється. Максимальні розміри виразок, визначені у перетині зварних з'єднань на мікрошліфах, наведені в табл. 6.

Таблиця 5

**Результати оцінювання корозійної стійкості різних зон зварних з'єднань досліджених зразків**

Характеристика зразків	Середня глибина корозійних ушкоджень зон зварного з'єднання, мм				Швидкість корозії зон зварного з'єднання, мм/рік				Відношення $\frac{P_{ЗШ}}{P_{ОМ}}$	
	400 годин		1500 годин		400 годин		1500 годин		400 годин	1500 годин
	$h_{ОМ}^{сер.}$	$h_{ЗШ}^{сер.}$	$h_{ОМ}^{сер.}$	$h_{ЗШ}^{сер.}$	$P_{ОМ}$	$P_{ЗШ}$	$P_{ОМ}$	$P_{ЗШ}$		
X70, ЗЗШ	0,208	0,245	0,206	0,128	0,19	0,22	0,05	0,031	1,16	0,62

На рис. 4 наведено фотографії зовнішнього вигляду зразків після випробувань та профілограми (рис. 5). Таким чином, після експонування впродовж 400 годин для середня глибина локальних корозійних уражень зварного з'єднання зі сталі X70 з заводським зварним швом становила: основного металу – 0,208 мм, зварного шва – 0,245 мм, найбільша – 0,26 мм та 0,2 мм, відповідно, табл. 5.

Таблиця 6

**Характеристика локальних корозійних ушкоджень біля поверхневих шарів металу зразків зварних з'єднань та їх розміри після корозійних випробувань в умовах впливу постійної деформації і корозійно-активного середовища за результатами металографічних досліджень**

Марка сталі	Максимальна довжина і глибина корозійних пошкоджень поверхні зварних з'єднань у перетині шліфа	
	Основний метал	Метал шва+ЗТВ
Після 400 годин		
X70	Протяжні корозійні виразки довжиною до 2 мм, глибиною до 0,26 мм	Окремі виразки глибиною до 0,2 мм, пітинги по лінії сплавлення
Після 1500 годин		
X70	Виразки довжиною 0,4 - 1 мм, глибиною до 0,26 мм. Пітинги	Значне локальне пошкодження ЗТВ довжиною до 12 мм, глибиною до 3-4 мм по лінії сплавлення. В іншій частині шва корозія не виражена.

З часом, після експонування в середовищі впродовж 1500 годин, середня глибина локальних уражень збільшилася для ОМ порівняно зі швом та становила 0,208 і 0,128 мм, відповідно. Найбільша глибина окремих локальних корозійних ушкоджень ОМ становила 0,26 мм. Відмічене протяжне пошкодження в зоні термічного впливу довжиною до 12 мм, глибиною до 3-4 мм по лінії сплавлення, в металі шва корозія не виражена. Відношення середньої глибини проникнення корозії в зварному шві до глибини проникнення корозії в основному металі зменшилося від 1,16 до 0,62, що вказувало на зменшення швидкості локального корозійного процесу на ЗЗШ з часом.

Отримані результати профілометрії та металографії для цього зварного з'єднання відрізняються від результатів електрохімічних випробувань.

За результатами прискорених корозійних випробувань в умовах, що моделюють експлуатаційні, встановлено, що у зварному з'єднанні зі сталі X70, більш активній корозії



піддається основний метал, причому така закономірність поведінки зварного з'єднання залишається з продовженням тривалості випробувань. Відношення середньої глибини проникнення корозії в зварному шві до глибини проникнення корозії в основному металі не змінилося та становило 1,13 як через 400 годин, так і через 1500 годин.

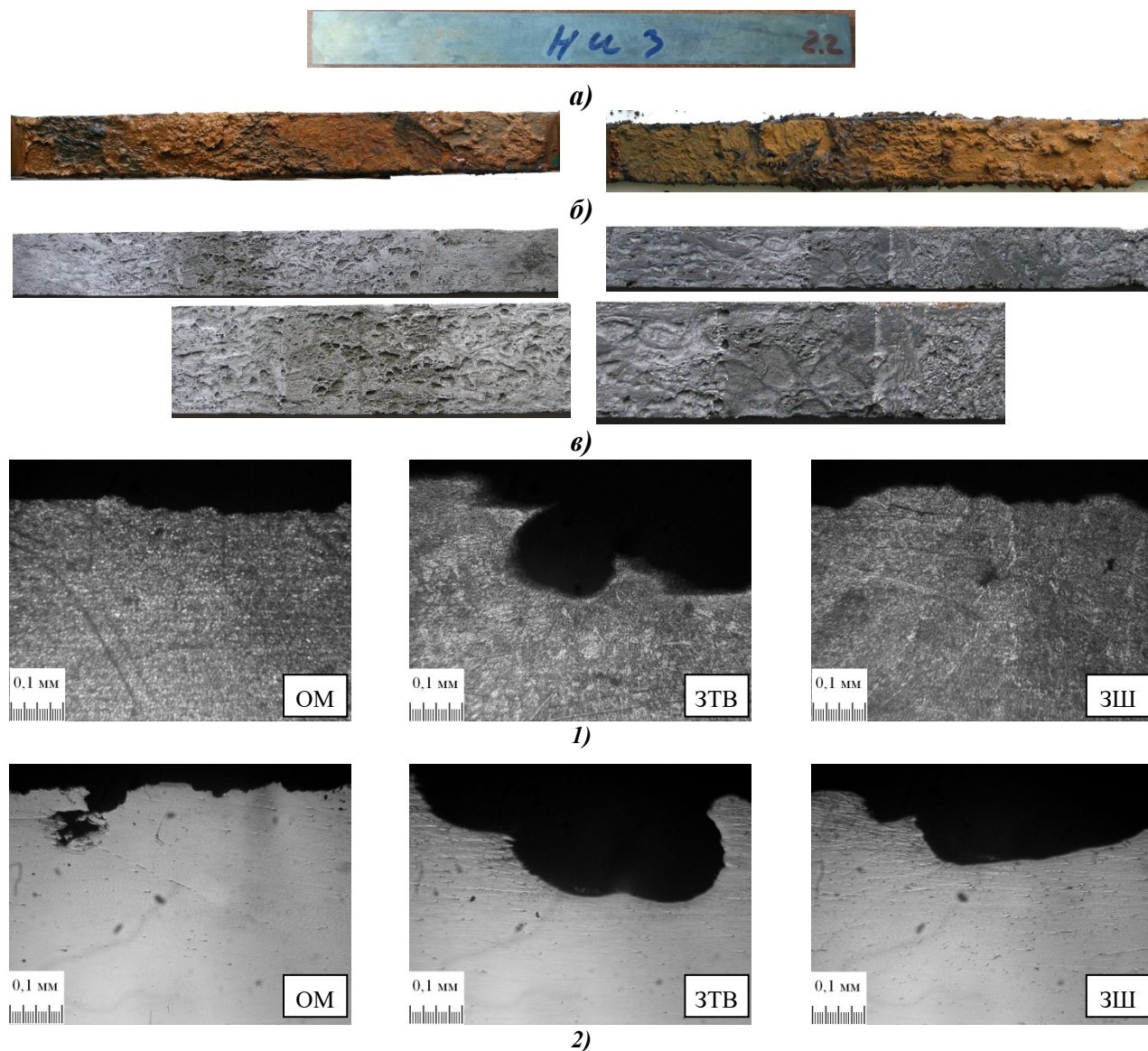


Рис. 4. Зовнішній вигляд зварного з'єднання зі сталі X70 з заводським зварним швом до та після корозійних випробувань в умовах, що моделюють експлуатаційні, впродовж різного часу: 1 – через 400 годин експонування; 2 – через 1500 годин експонування; а – до корозійних випробувань; б – з продуктами корозії; в – після видалення продуктів корозії; г – металографічні шліфи. ОМ – основний метал, ЗТВ – зона термічного впливу, ЗШ – заводський зварний шов

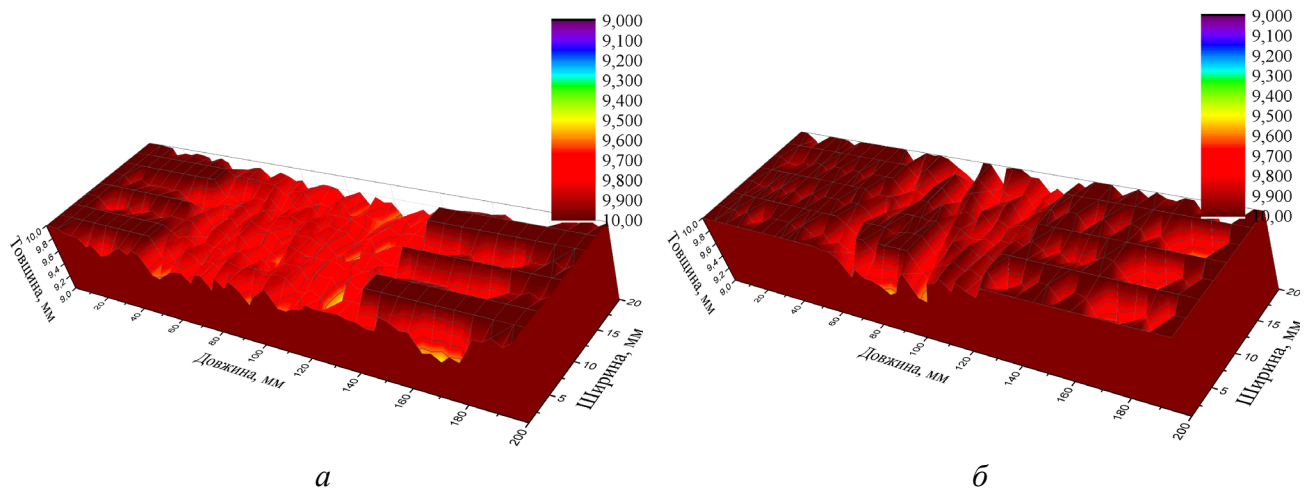


Рис. 5. Профілограма зварного з'єднання зі сталі X70 з заводським зварним швом після корозійних випробувань впродовж різного часу: а – 400 годин; б – 1500 годин

**Висновки.** За результатами дослідження гетерогенності зварного з'єднання зі сталі X70 з поздовжнім заводським зварним швом електрохімічними методами та методом оптичної мікроскопії встановлено, що більша електрохімічна активність зварного шва обумовлена меншим вмістом, порівняно з основним металом, легуючих добавок, а саме: Si, Al, Nb, Ti, Cr і гетерогенністю структури зварного шва. Аналізуючи відмінності в результатах, отриманих під час електрохімічних та прискорених корозійних випробувань, зроблено висновок про те, що вирішальним чинником у локальній корозії зварних з'єднань є корозійно-активне середовище і умови перебігу корозійного процесу, зокрема – тонкоплівкова корозія в двофазному середовищі (вуглеводень-вода).

*Робота виконана за підтримки Національної академії наук України у 2016–2018 рр. (державний реєстраційний номер теми 0115U006701).*

#### Література

1. Коррозия : Справ. изд. / под. ред. Л. Л. Шрайера ; пер. с англ. – М. : Металлургия, 1982. – 632 с.
2. Томашов Н. Д. Коррозия и защита сталей / Н. Д. Томашов, А. А. Локотиллов. – М. : Машгиз, 1959. – 171 с.
3. Pourbaix M. Rapport technique No 160 Cebelcor. – Brussel. – 1969.
4. Сайт “Википедия”: Электрохимический ряд активности металлов. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%BE%D0%B2> (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з

#### References

1. Shraier, L. L. (1982). *Korroziya* [Corrosion]. Moscow [in Russian].
2. Tomashov, N. D., Lokotyllov, A. A. (1959). *Korroziya y zashchyta staley* [Corrosion and steel protection]. Moscow [in Russian].
3. Pourbaix M. (1969) Rapport technique No 160 Cebelcor. Brussel [in English].
4. Sayt “Vikipediya”: Elektrokhimicheskiy ryad aktivnosti metallov [Site Wikipedia Electrochemical series of metal activity]. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%BE%D0%B2> [in Russian].
5. Sayt “Shkola suchasnykh znan”: Standartni 126

екрану.

5. Сайт “Школа сучасних знань” : Стандарти електродні потенціали деяких окисно-відновних систем. [Електронний ресурс] – Режим доступу : [http://www.zhu.edu.ua/mk\\_school/mod/glossary/view.php?id=3743](http://www.zhu.edu.ua/mk_school/mod/glossary/view.php?id=3743), (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

6. Сайт “Справочник химика 21. Химия и химическая технология” : Титан потенциалы коррозии. [Електронний ресурс] : – Режим доступу : <http://chem21.info/info/489595/>, (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

7. Сайт “Chemport.ru”: Электронный справочник. Нормальные окислительно-восстановительные потенциалы ванадия. [Електронний ресурс] : – Режим доступу : <http://www.chemport.ru/data/data392.shtml>, (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

8. Сайт «Справочник химика 21. Химия и химическая технология»: Ниобий, нормальный потенциал [Електронний ресурс] : – Режим доступу: <http://chem21.info/info/1293237/>, (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

9. Сайт «Справочник химика 21. Химия и химическая технология»: Электродный потенциал молибдена [Електронний ресурс] : – Режим доступу : <http://chem21.info/info/859819/>, (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

10. ГОСТ 9.901.2-89. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов в виде изогнутого бруса. Москва. Дата введения 1991-01-01.

11. Corrosion direct assessment of gastransmission pipelines – methodology. – Final Report. – GTI Contract No. 8329. – January 31, 2001 – April 1, 2002. [Електронний ресурс] : – Режим доступу : <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/004/gri.02-0057.2002.pdf>, (дата звернення 29.12.2018) – Заголовок з екрану.

12. Негреев В. Г. Борьба с коррозией в нефтедобывающей промышленности. / В. Г. Негреев, А. А. Гоник, И.А. Мамедов, Г. С. Кесельман // Серия Борьба с коррозией в нефтедобывающей промышленности. – ЦНИИТЭнефтегаз. – Москва, 1965. – 84 с.

13. ОСТ 5.9255–76 Металлы и покрытия для судостроения. Методы ускоренных коррозионных испытаний. Москва. Дата введения 1977-01-01.

elektrodni potentsialy deyakyx okysno-vidnovnykh system [Site Website School of Modern Knowledge: Standard electrode potentials of some redox systems]. <http://www.zhu.edu.ua/>. Retrieved from [http://www.zhu.edu.ua/mk\\_school/mod/glossary/view.php?id=3743](http://www.zhu.edu.ua/mk_school/mod/glossary/view.php?id=3743) [in Ukrainian].

6. Sayt “Spravochnik khimika 21. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya”: Titan potentsialy korrozii [Site “Chemistry Handbook 21. Chemistry and Chemical Technology”: Titanium corrosion potentials]. <https://chem21.info/>. Retrieved from <http://chem21.info/info/489595/> [in Russian].

7. Sayt “Chemport.ru”: Elektronnyy spravochnik. Normal'nyye okislitel'no-vosstanovitel'nyye potentsialy vanadiya. [Site “Chemport.ru” : Electronic reference book. Normal redox potentials of vanadium]. <http://www.chemport.ru/>. Retrieved from <http://chem21.info/info/859819/> [in Russian].

8. Sayt “Spravochnik khimika 21. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya”: Niobiy, normal'nyy potentsial [Site “Chemistry Handbook 21. Chemistry and Chemical Technology”: Niobium, normal potential]. <https://chem21.info/>. Retrieved from <http://chem21.info/info/1293237/> [in Russian].

9. Sayt “Spravochnik khimika 21. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya”: Elektrodnyy potentsial molibdena [Site “Chemistry Handbook 21. Chemistry and Chemical Technology”: Molybdenum electrode potential]. <https://chem21.info/>. Retrieved from <http://chem21.info/info/859819/> [in Russian].

10. GOST 9.901.2-89. Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Metally i splavy. Ispytaniya na korroziionnoye rastreskivaniye obrabztsov v vide izognutogo brusa [Unified system of protection against corrosion and aging. Metals and alloys. Tests for corrosion cracking of specimens in the form of a curved beam]. Moscow, Standartinform Publ., 1993, 36 p.

11. Corrosion direct assessment of gastransmission pipelines – methodology. – Final Report. – GTI Contract No. 8329. – January 31, 2001 – April 1, 2002. Retrieved from <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/004/gri.02-0057.2002.pdf> [in English].

12. Negreyev, V. G., Gonik, A. A., Mamedov, I. A., Kesel'man, G. S. (1964). Bor'ba s korroziyey v nefte dobyvayushchey promyshlennosti. [Corrosion control in the oil industry] *Seriya Bor'ba s korroziyey v nefte dobyvayushchey promyshlennosti - Series Corrosion Control in the Oil Industry*. Moscow [in Russian].

13. OST 5.9255–76 *Metally i pokrytiya dlya sudostroyeniya. Metody uskorennykh korroziionnykh ispytaniy*. [Metals and coatings for shipbuilding. Accelerated corrosion test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 1977, 27 p.

LYUDMILA NYRKOVA

lnyrkova@gmail.com

Chief of the department of welding of oil and gas pipes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>

Researcher ID: 6506092726

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of  
Ukraine

YULIYA BORYSENKO

boria95@ukr.net

Associate professor, assistant professor of department  
for electrochemical power engineering & chemistry

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1639-0205>

Kyiv National University of Technologies and Design

## ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ КОРРОЗИИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБНОЙ СТАЛИ X70, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ЕГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТЬЮ

НЫРКОВА Л. И.<sup>1</sup>, ГОНЧАРЕНКО Л. В.<sup>1</sup>, БОРИСЕНКО Ю. В.<sup>2</sup>, ХАРЧЕНКО Ю. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

<sup>2</sup>Киевский национальный университет технологий и дизайна

**Цель.** Исследование влияния химического состава и структуры на локальную коррозию сварного соединения трубной стали X70 в условиях, моделирующих эксплуатационные, и определение основных факторов коррозии.

**Методика.** Применяли стандартные методы: потенциометрия, метод поляризационных кривых, исследование сопротивляемости коррозии при постоянной деформации, профилометрия, метод оптической металлографии.

**Результаты.** Изучена электрохимическая гетерогенность сварного соединения (на примере стали X70) с заводским сварным швом. Установлено, что в сварном шве этого соединения несколько меньшее содержание по сравнению с основным металлом следующих элементов: Al (0,025% и 0,02% соответственно) и Nb (0,033% и 0,058% соответственно), но большее содержание Mo и Cr. Структура основного металла - феррито-бейнитная, небольшие перлитные образования, структура шва разнородная, содержит дисперсный игольчатый, зернограничный полигональный, доэвтектоидный феррит и отдельные участки пластинчатого феррита. Сделан вывод, что в исследованном сварном соединении большую электрохимическую активность какой-либо зоны можно связать с меньшим содержанием в ней легирующих элементов или особенностями микроструктуры. По результатам электрохимических и ускоренных коррозионно-механических испытаний в условиях, моделирующих эксплуатационные, установлено, что решающим фактором для иницирования локальной коррозии сварных соединений является коррозионно-активная среда и условия протекания коррозионного процесса, в частности - тонкопленочная коррозия в двухфазной среде (углеводород- вода).

**Научная новизна.** По результатам комплексного исследования получены новые данные о влиянии химического состава и структуры зон сварного соединения стали X70 с заводским продольным сварным швом на ее склонность к локальному коррозионному разрушению. Установлено, более высокая электрохимическая активность любой зоны сварного соединения может быть обусловлена меньшим содержанием в ней легирующих добавок (это касается металла сварного шва) и/или особенностями микроструктуры (относительно металла сварного шва и зоны термического влияния).

**Практическая значимость.** Разработан и обоснован методический подход к исследованию локальной коррозии сварных соединений в условиях, моделирующих эксплуатационные, на примере сварного соединения стали X70. Установлено, что решающим фактором для иницирования локальной коррозии сварных соединений является коррозионно-активная среда и условия протекания коррозионного процесса, в частности - тонкопленочная коррозия в двухфазном среде (углеводород - вода).

**Ключевые слова:** трубная сталь X70, потенциометрия, метод поляризационных кривых, катодный потенциал, электрохимическая коррозия, коррозия под напряжением.

## FEATURES OF LOCAL CORROSION OF WELDED JOINT OF PIPE STEEL X70 DUE TO ITS ELECTROCHEMICAL HETEROGENITY

NYRKOVA L. I.<sup>1</sup>, GONCHARENKO L. V.<sup>1</sup>, BORYSENKO Yu. V.<sup>2</sup>, KHARCHENKO Yu. O.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

<sup>2</sup>Kyiv National University of Technologies and Design

**Purpose.** Establishing the influence of chemical composition and structure on local corrosion of the welded joint of X70 pipe steel in the conditions simulating operating conditions, and determining the main corrosion factors.

**Methodology.** Standard methods were used: potentiometry, polarization curves method, research of corrosion resistance at constant deformation, profilometry, optical metallography.

**Results.** The electrochemical heterogeneity of the welded joint (on the example of X70 steel) with the factory weld was studied.

It was found that in the weld of this joint has a slightly lower content compared to the base metal of the following elements: Al (0.025% and 0.02%, respectively) and Nb (0.033% and 0.058%, respectively), but a higher content of Mo and Cr. The structure of base metal is ferritic-bainite, has small pearlite formations, the structure of the seam is heterogeneous, contains dispersed needle, grain boundary polygonal, pre-eutectoid ferrite and separate areas of lamellar ferrite. It is concluded that in the welded joint under studied, the greater electrochemical activity of any zone can be attributed to the lower content of alloying elements or features of the microstructure. According to the results of electrochemical and accelerated corrosion-mechanical tests in the simulated operating conditions, it was found that the determinative factor for initiating of local corrosion of welded joints is the corrosive environment and conditions of the corrosion process flying, in particular – thin-film corrosion in a two-phase medium (hydrocarbon water).

**Scientific originality.** According to the results of complex research, new data on the influence of the chemical composition and structure of the welded joints of steel X70 with factory extensional weld on the susceptibility to local corrosion were obtained. It was found that in a welded joint, the greater electrochemical activity of any zone is due to the lower content of alloying additives (this applies to the weld metal) and/or the peculiarities of the microstructure (for weld metal and high affected zone).

**Practical value.** The methodological approach to investigation of local corrosion of welded joints in the conditions which are simulating the condition of operation, on an example of welded joints of X70 steel is developed and substantiate. A laboratory stand for research has been developed. It is established that the determinative factor for initiating of local corrosion of welded joints is the corrosive-active medium and the conditions of the corrosion process flying, particularly – thin-film corrosion in a two-phase medium (hydrocarbon-water).

**Key words:** X70 pipe steel, potentiometry, polarization curve method, cathodic potential, electrochemical corrosion, stress corrosion.