

**Людмила НИРКОВА, Сергій ПРОКОПЧУК, Світлана ОСАДЧУК,
Лариса ГОНЧАРЕНКО**

**КОРОЗИЯ ПІД НАПРУЖЕННЯМ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБНОЇ СТАЛІ,
ОТРИМАНИХ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ ЗВАРЮВАННЯ**

*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
11, вул. Казимира Малевича, м. Київ, 03150, Україна.
E-mail: serhii.prokopchuk@gmail.com*

**Lyudmyla NYRKOVA, Serhii PROKOPCHUK, Svitlana OSADCHYK,
Larysa GONCHARENKO**

**THE STRESS-CORROSION OF WELDED JOINTS OF THE PIPE STEEL,
OBTAINED BY DIFFERENT METHODS OF WELDING**

*E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
11, Kazimir Malevich St., Kyiv, 03150, Ukraine.
E-mail: serhii.prokopchuk@gmail.com*

ABSTRACT

Comparative studies' results of corrosion resistance of welded pipes of steel 17G1S obtained by different welding methods, namely – arc welding and high-frequency current welding (HFC) are presented.

According to the results of electrochemical studies, the difference of corrosion potentials between the base metal 17G1S steel and the welds was equal: 8 mV, between the base metal and the arc weld and 16 mV – between base metal, which does not exceed the permissible value for welded joints. It is shown that the resistance of welded joints against anodic dissolution with HFC weld is no worse than that for joints made by arc welding, which is confirmed by the uniform difference in the anodic dissolution currents between the base metal and the welds.

The results of accelerated corrosion-mechanical tests for 1000 h in 3% NaCl solution under conditions of constant deformation under maximum load (0.95 from the yield point) showed that the values of corrosion rate of welded joints do not significantly differ from the values of corrosion rate for the base metal and equal to 0.199 mm/year for 17G1S steel, 0.202 mm/year for high-frequency welded joints and 0.194 mm/year for arc joints. Under these conditions, the metal is characterized as being reduced resistant against corrosion according to the corrosion resistance scale (the corrosion rate from 0.1 to 0.5 mm/year corresponds to the reduced resistant metal). According to the results of complex of electrochemical and corrosion-mechanical studies, it was established that the corrosion resistance of welded joints made by HFC welding no worse the corrosion resistance of welded joint made by arc welding.

KEY WORDS: *welded joints, high frequency welding, arc welding, corrosion under loading, potential, corrosion-mechanical tests.*

ВСТУП

У технологічному процесі виготовлення труб застосовують два способи зварювання – електродугове зварювання (ЕДЗ) і високочастотне зварювання (ВЧЗ). У роботі [1] показано, що зварні з'єднання труб, виконані високочастотним зварюванням порівняно з дуговим, мають більш високу корозійну тривкість, оскільки мають меншу ширину зони термічного впливу, однорідність структури характерних зон зварного з'єднання. Однак, їх корозійно-механічна тривкість нижча порівняно з основним металом, що може обмежувати ресурс працездатності трубопроводу. Однією з основних причин відмов таких трубопроводів є корозія внутрішньої стінки [2-6], і найбільш уразливою є область зварного з'єднання [4-6]. У зв'язку з розширенням застосування ВЧЗ труб для нафтопроводів, корисно було б порівняти корозійну стійкість зварних труб, отриманих різними способами зварювання, а саме – дуговим та високочастотним.

Метою роботи було дослідити електрохімічну гетерогенність та опірність корозії під напруженням зварних з'єднань, отриманих різними способами зварювання.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводили на зразках зварних з'єднань труб зі сталі 17Г1С:

- зразок з ВЧЗ швом – з труби розміром (530×10) mm;
- зразок з дуговим швом – з труби розміром (1220×10,5) mm.

Труби, з яких виготовляли зварні з'єднання для досліджень, розраховано на різний робочий тиск, тому їх механічні властивості. Під час випробувань зварні з'єднання навантажували з урахуванням показників механічної міцності основного металу цих труб.

За хімічним складом основний метал є типовим для сталі 17Г1С.

Механічні властивості: труби розміром (530×10) mm: основного металу – $\sigma_T = 400-430$ МПа, $\sigma_B = 560-580$ МПа; зварного з'єднання – $\sigma_B = 550-580$ МПа; труби розміром (1220×10,5) mm: основного металу – $\sigma_T = 522,2$ МПа; $\sigma_B = 646,30$ МПа; зварного з'єднання – $\sigma_B = 616,80$ МПа.

Дослідження мікроструктури металу зварних з'єднань виконували методом оптичної металографії за стандартною методикою.

Робочий розчин – 3% NaCl

Перед дослідженнями зразки шліфували шліфувальним папером різної зернистості від Р320 до Р1000 (згідно з ISO 6344-3), промивали проточною і дистильованою водою та протирали етиловим спиртом. Вимірювання потенціалів та зняття поляризаційних кривих проводили у притискній комірці діаметром робочої частини 9 mm, яку встановлювали на основний метал або на область зварного шва. Потенціал корозії вимірювали впродовж 60 min. Поляризаційні криві знімали в потенціодинамічному режимі зі швидкістю сканування потенціалу 0,5 mV/s за триелектродною схемою. Робочими електродами слугували основний метал та зварний шов, допоміжним – платинова пластина, електродом порівняння – хлоридсрібний електрод.

Корозійно-механічні випробування основного металу та зварних з'єднань проводили упродовж 1000 h у розчині 3% NaCl. Розмір зразків – (115×10×3) mm. Площа зварного шва ВЧЗ зварного з'єднання становила близько (4,7-5,1)% від площі зразка, з дугового шва – близько 10%. Випробовували зразки у ненапруженому та у напруженому станах при постійній деформації упродовж 1000 h з періодичним зніманням зразків через 240, 480 та 1000 h та визначенням швидкості корозії. Швидкість суцільної корозії визначали методом масометрії за стандартною методикою. Для навантаження застосовували чотириточкову схему вигину. Після експозиції зразків у розчині визначали вид корозійних пошкоджень та оцінювали ступінь ураження поверхні корозією.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Мікроструктура основного металу труби розміром (1220×10,5) mm складається з дисперсної суміші полігонального фериту з продуктами розпаду бейніту та мартенситу. Кількість феритної складової не перевищує 30% (рис. 1 а). Неметалеві включення в основному металі є типовими для сталі такого класу і представлені, переважно, оксидами рядковими, силікатами пластичними, крихкими і недеформованими (у тому числі глобулярними), сульфідами та одиничними нітридами алюмінію.

Мікроструктура металу дугового шва з зовнішнього боку є типовою структурою низьколегованого металу, після гартування і відпуску, та представляє дисперсну феритно-карбідну суміш (типу сорбіт) з виділеннями фериту (рис. 1b). Неметалеві включення в металі дугового шва дослідженого зварного з'єднання за морфологією, кількістю та розмірами є характерними для металу швів, виконаних на сталі такого класу із застосуванням кислого плавленого флюсу (типу АН-60) і представляють, в основному, глобулярні кремній-марганцеві оксиди.

Структура основного металу ВЧЗ труби розміром 530×10,0 mm – суміш дрібнозернистого фериту і перліту, феритне зерно (9-10) номеру, смугастість – (4-5) бал за шкалою 3 ГОСТ 5640 (рис. 2 а). Забрудненість основного металу локальна, в окремих зонах – шлаковими включеннями, дрібними глобулярними оксидами, витягнутими оксидами, зокрема

біля зони сплавлення. Мікроструктура металу зварного шва – типова дрібнозерниста ферито-перлітна суміш. Ширина зони сплавлення – біля 0,26 mm (рис.2 b).

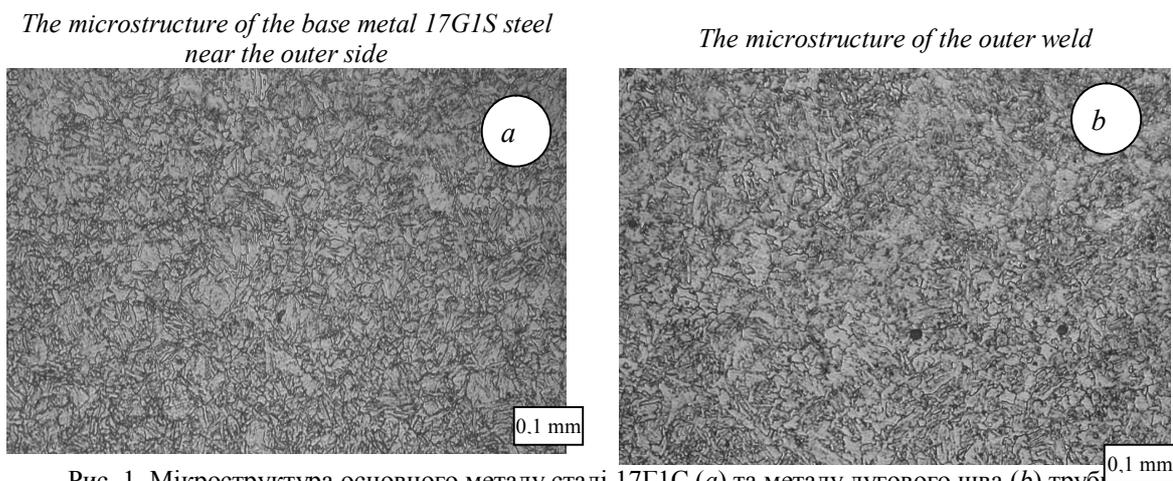


Рис. 1. Мікроструктура основного металу сталі 17Г1С (a) та металу дугового шва (b) труби розміром 1220×10,5 mm.

Fig. 1. The microstructure of base metal 17G1S steel (a) and arc welded metal of the pipe (b) by the size 1220×10,5 mm.

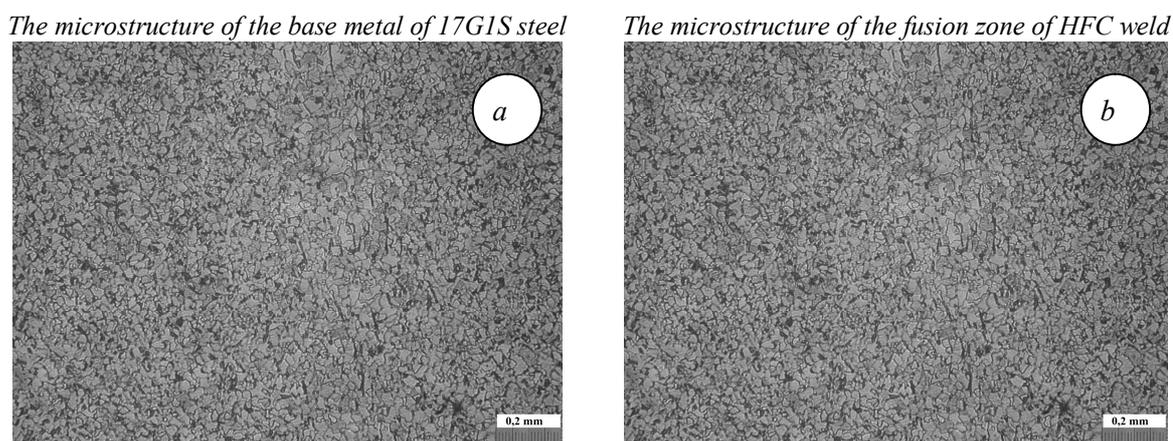


Рис. 2. Мікроструктура основного металу (a) та металу ВЧЗ шва (b) труби розміром 530×10,0 mm.

Fig. 2. Microstructure of base metal (a) and arc welded metal of the pipe (b) by the size 530×10,0 mm.

Отже мікроструктура основного металу сталі 17Г1С та зварного шва, виконаного дуговим способом, рис. 1, та мікроструктура основного металу та шва, виконаного височастотним зварюванням, рис. 2, практично однакова, що свідчить про відсутність структурної гетерогенності.

Потенціали корозії ВЧЗ шва і дугового шва дещо негативніше, ніж сталі 17Г1С. Однак, різниця потенціалів між основним металом і ВЧЗ швом та основним металом і дуговим швом становить, відповідно 8 та 16 mV, табл. 1. Можна очікувати, що такі зварні з'єднання будуть чинити опір корозії.

Анодні криві для швів знаходяться в області більш від'ємних потенціалів порівняно з основним металом. Струми анодного розчинення металу обох швів практично співпадають в області від потенціалу корозії до 0,5 V, що вказує на схожість їх анодної поведінки. Різниця струмів анодного розчинення між основним металом та зварними швами за потенціалу активного анодного розчинення, наприклад, за потенціалу -0,64 V, має близькі значення і рівні 0,107 A/m² для ВЧЗ шва і 0,109 A/m² – для дугового. Нахили анодних кривих також мало відрізняються, табл. 1. Менший анодний нахил спостерігали для області дугового шва, що може сприяти більшій швидкості його розчинення за певних умов. За значеннями нахилів анодних кривих показано, що корозійний процес у нейтральному водному розчині перебігає з дифузійним контролем.

Поляризаційні криві наведено на рис. 3.

Таблиця 1. Електрохімічні показники сталі 17Г1С та зварних швів, отриманих дуговим та високочастотним зварюванням у розчині 3% NaCl
 Table 1. Electrochemical characteristics of 17G1S steel and welds, obtained by arc welding and high frequency current welding in 3% NaCl solution

Зона зварного з'єднання	E_k, V	Електрохімічні показники процесів					
		анодного		катодного			
		b_a, V	$i, A/m^2$	$i_d, A/m^2$	E_{H_2}, V	Катодні струми, A/m^2 , за поляризаційних потенціалів, V	
ОМ	-0,658	0,064	0,023	0,047	-0,79	-0,75	-1,05
ВЧЗ шов	-0,666	0,064	0,130	0,120	-0,87	0,048	0,97
Дуговий шов	-0,674	0,049	0,132	0,053	-1,11	0,093	0,62
Примітки. E_k - потенціал корозії; b_a - нахил анодної поляризаційної кривої; i - густина анодного струму за потенціалу -0,64 В; i_d - густина граничного дифузійного струму відновлення кисню; E_{H_2} - потенціал початку виділення водню							

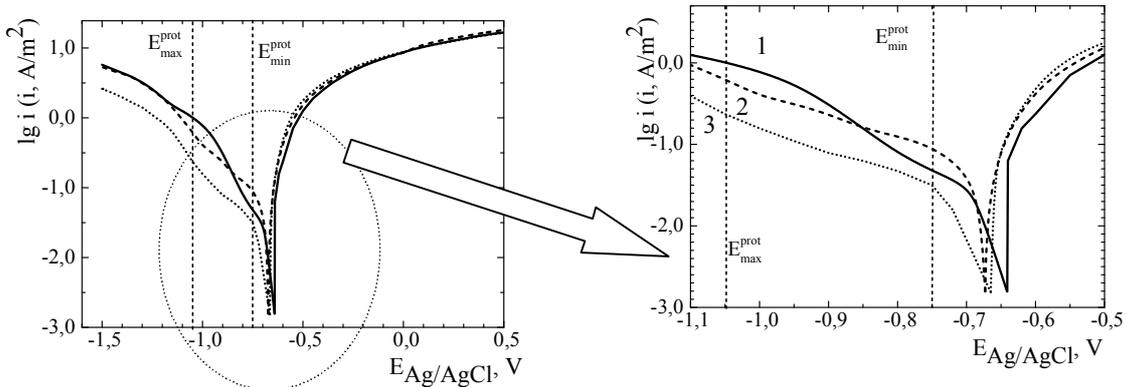


Рис. 3. Поляризаційні криві основного металу сталі 17Г1С (1) та зварних швів, виконаних за технологією високочастотного (2) та дугового (3) зварювання.

Fig. 3. Polarization curves of base metal of 17G1S steel (1) and welds, obtained by high frequency current welding (2) and arc welding (3).

Відмічено різницю електрохімічних характеристик основного металу та зварних швів в катодній області. Отже, значення граничного дифузійного струму для ВЧЗ шва та дугового шва практично однакові і в $\sim 2,6$ рази більше порівняно з основним металом, табл. 1. Потенціали початку виділення водню для ВЧЗ шва та основного металу сталі 17Г1С відрізняються незначно. Для дугового шва цей потенціал від'ємніший, ніж для основного металу, табл. 1.

Оскільки представляє інтерес стан поверхні труб в умовах катодного захисту, проаналізовано захисні струми в нормованому діапазоні захисних потенціалів. Встановлено:

- за мінімального захисного потенціалу: захисні струми більші для області ВЧЗ шва в $\sim 1,9$ разів порівняно з основним металом, для дугового шва – навпаки менше в $\sim 1,5$ рази;

- за максимального захисного потенціалу захисні струми для обох швів менше, ніж струми на основному металі: в $\sim 1,6$ разів для ВЧЗ шва, в $\sim 4,2$ рази – для дугового шва.

Таким чином, під час експлуатації без наведення захисного потенціалу опірність анодному розчиненню зварних з'єднань з ВЧЗ швом не гірше, ніж для з'єднань з дуговим зварним швом. В умовах катодного захисту за мінімального захисного потенціалу більші струми на ВЧЗ шві можуть викликати перебіг небажаних процесів наводнювання цієї зони. За максимального захисного потенціалу локальні катодні струми більші на основному металі для обох зварних з'єднань, тобто область зварних швів менш схильна до локального наводнювання.

Крім результатів електрохімічних досліджень для практичного застосування важливо вивчити корозійну тривкість зварних з'єднань, виконаних різними способами зварювання в умовах сумісної дії корозивного середовища та напружень. Такі дослідження проведені за максимального навантаження $0,95\sigma_r$ упродовж 1000 h.

Під час контакту зразків з розчином на поверхні утворювався шар продуктів корозії бурого кольору, що властиве для оксидів заліза. Після їх видалення на поверхні виявлені корозійні плями різних розмірів. Плями мають різний колір на поверхневому шарі (потемніння)

та малу глибину. Локального ураження поверхні в області зварних швів за цих умов не виявлено. Результати корозійно-механічних досліджень представлені в табл. 2.

Таблиця. 2. Результати оцінювання корозійної стійкості зразків зварних з'єднань сталі 17Г1С після досліджень у розчині 3% NaCl через 100 h

Table 2. The estimation results of corrosion resistance of 17G1S steel and welded joints after tests in 3% NaCl solution for 1000 h

Характеристика зразків	Стан зразка	Назва показників			Оцінювання згідно з [7]	
		Вид корозійних уражень	Ступінь ураження поверхні корозією, %	Швидкість корозії, mm/year	Бал	Група стійкості
Основний метал	ненапружений	Корозійні плями, виразки діаметром ≤ 1 mm	50-70	0,072	5	Стійкий
	напружений	Корозійні плями	90-95	0,199	6	Понижено стійкий
Зварне з'єднання з ВЧЗ швом	ненапружений	Корозійні плями	30-50	0,116	5	Стійкий
	напружений	Корозійні плями	80-60	0,202	6	Понижено стійкий
Зварне з'єднання з дуговим швом	ненапружений	Корозійні плями, виразки діаметром ≤ 1 mm	70-90	0,075	5	Стійкий
	напружений	Корозійні плями	70-80	0,194	6	Понижено стійкий

Швидкість корозії у ненапруженому стані при витримуванні у розчині від 240 до 1000 h зростає: від 0,057 до 0,076 mm/year для сталі 17Г1С, від 0,076 до 0,116 mm/year для зварного з'єднання з ВЧЗ швом, від 0,034 до 0,075 mm/year для з'єднання з дуговим швом, рис. 4 а. За такої швидкості корозії, незважаючи на різницю значень, метал характеризується як стійкий згідно зі шкалою корозійної стійкості (якщо швидкість корозії знаходиться в межах від 0,01 до 0,1 mm/year, метал відноситься до групи стійкості «стійкий»), табл. 2.

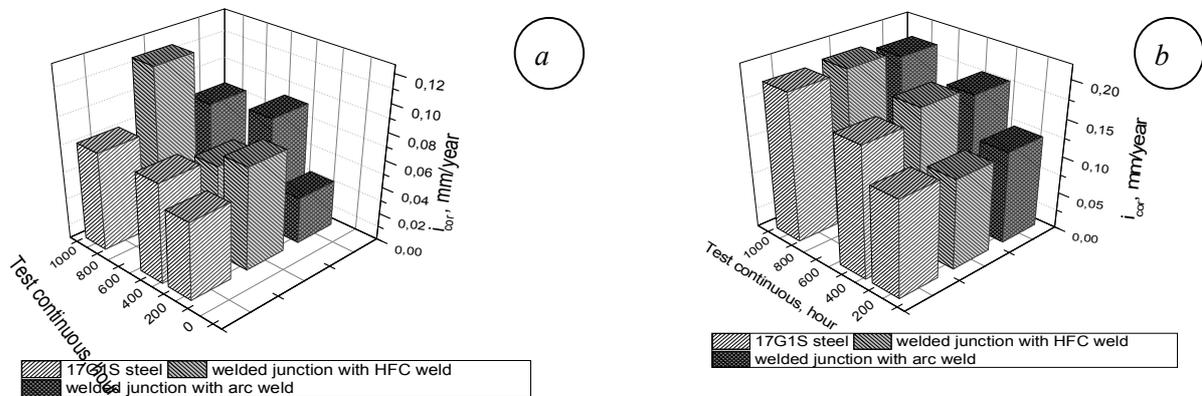


Рис. 4. Швидкість корозії сталі 17Г1С та зварних з'єднань, отриманих височастотним та дуговим зварюванням, у ненапруженому (а) та напруженому (b) станах упродовж 1000 h.

Fig. 4. Corrosion rate of 17G1S steel and welded joints, obtained by high frequency current welding and arc welding at unloaded state (a) and loaded state (b) during 1000 h.

При збільшенні часу витримування у розчині від 240 до 1000 h швидкість корозії зразків у напруженому стані також зростає: від 0,130 до 0,199 mm/year – для сталі 17Г1С, від 0,121 до 0,202 mm/year – для зварного з'єднання з ВЧЗ швом, від 0,124 до 0,194 mm/year – для з'єднання з дуговим швом, рис. 4 b. Закономірно, що значення швидкості корозії у напруженому стані вище, ніж у ненапруженому. Але слід відмітити, що, через 1000 h значення швидкості корозії основного металу та зварних з'єднань відрізняється мало та дорівнюють 0,199 mm/year для сталі 17Г1С, 0,202 mm/year – для ВЧЗ зварного з'єднання і 0,194 mm/year – для дугового з'єднання. Метал характеризується як понижено стійкий, згідно зі шкалою корозійної стійкості (якщо швидкість корозії знаходиться в межах від 0,1 до 0,5 mm/year, метал відноситься до групи стійкості «понижено стійкий»).

Таким чином, в умовах постійної деформації при повному зануренні у корозивне середовище зварне з'єднання, отримане за технологією ВЧЗ зварювання за корозійною стійкістю, не гірше зварного з'єднання, виконаного дуговим зварюванням. Треба зауважити, що ці результати отримані для зразків з шліфованою поверхнею. У разі існування будь-яких поверхневих дефектів (несуцільності зварного шва, пор, несплавлення кромки або залишків ґрата при ВЧЗ зварюванні тощо) не виключений перебіг локальної корозії. Крім того, в умовах сумісної дії навантаження та катодної поляризації опірність корозії може відрізнятися, що буде показано у подальших роботах.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що різниця потенціалів корозії між основним металом сталі 17Г1С і зварним швом, виконаним високочастотним зварюванням становить 8 mV, між основним металом і дуговим швом – 16 mV, що не перевищує допустиме значення (30 mV) для зварних з'єднань. Можна очікувати, що спосіб зварювання буде мало впливати на корозійну тривкість зварних з'єднань у ненапруженому стані.

Опірність анодному розчиненню зварних з'єднань з ВЧЗ швом не гірше, ніж для з'єднань з дуговим зварним швом, що підтверджено однаковою різницею струмів анодного розчинення між основним металом та зварними швами. За значеннями нахилів анодних кривих показано, що корозійний процес як на сталі, так і на швах, у водному розчині перебігає з дифузійним контролем.

В умовах катодного захисту за мінімального захисного потенціалу більші струми на ВЧЗ шві можуть викликати перебіг небажаних процесів наводнювання цієї зони. За максимального захисного потенціалу локальні катодні струми більші на основному металі для обох зварних з'єднань, тобто область зварних швів менш схильна до локального наводнювання.

За результатами прискорених корозійно-механічних випробувань у розчині 3% NaCl в умовах постійної деформації за максимального навантаження (0,95 від границі текучості) продовж 1000 h встановлено, що різниця швидкості корозії для зразків основного металу та зварних з'єднань незначна, і метал характеризується як стійкий, згідно зі шкалою корозійної стійкості (швидкість корозії від 0,01 до 0,1 mm/year). У напруженому стані швидкості корозії як основного металу, так і зварних з'єднань відрізняється мало та дорівнюють, 0,199 mm/year для сталі 17Г1С, 0,202 mm/year – для високочастотного зварного з'єднання і 0,194 mm/year – для дугового з'єднання. Метал характеризується як понижено стійкий, згідно зі шкалою корозійної стійкості (швидкість корозії від 0,1 до 0,5 mm/year).

В умовах постійної деформації при повному зануренні у корозивне середовище зварне з'єднання, отримане за технологією високочастотного зварювання, за корозійною стійкістю не гірше зварного з'єднання, отриманого дуговим зварюванням.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лучкин Р.С., Выбойщик Л.М. Повышение однородности структуры и свойств сварного соединения труб нефтяного сортамента // Сборник трудов всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства». – Тольятти: ТГУ. – 2006. – I часть. – С. 134-140.
2. In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel / G. Gabetta, H. Nykyforchyn, E. Lunarska, P.P. Zonta, O.T. Tsyulnyk, K. Nikiforov, M.I. Hredil, D.Yu. Petryna, T. Vuherer // Materials Science. – 2008. – 44, No1. – P. 88–99.
3. Environmentally assisted in-bulk steel degradation of long term service gas trunkline / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O.T. Tsyulnyk, K. Nikiforov, M.E. Genarro, G. Gabetta // Engineering Failure Analysis. – 2010. – 17(3). – 624–632.
4. Эндель Н.И. Структурные факторы коррозионной стойкости сталей для нефтепромысловых трубопроводов. Дис. канд. техн. наук. – 2011. – 146 с.
5. Оценка качества сварных соединений по эталонам структуры / Л.М. Выбойщик, Н.Л. Сопин, М.И. Колосовский, Е.И. Ермольчик, А.С. Абуздин. – Режим доступа: https://vosafety.ru/wp-content/uploads/2018/11/12_Ocenka_kachestva_svarnyh_soedineniy_po_etalonam_structury.pdf.
6. Выбойщик Л.М., Лучкин Р.С., Иоффе А.В. Обеспечение коррозионной стойкости сварных соединений нефтепроводных труб на уровне свариваемого металла // Вектор науки ТГУ. – 2010. – № 4 (14). – С. 60-64.
7. Рачев Х., Стефанова С. Справочник по коррозии: Пер. с болг./ перевод Нейковского С.И., под ред. Н.И. Исаева. – М.: Мир, 1982. – 520 с.