

ПРИЧИНИ ПОШКОДЖЕННЯ ТРУБОПРОВОДУ ЗІ СТАЛІ AISI 316L

С.О. Осадчук, Л.І. Ниркова, Л.В. Гончаренко

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03105, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: lnyrkova@gmail.com

Досліджено пошкоджений трубопровід з нержавкої сталі AISI 316L, призначений для транспортування холодної води, на підприємстві харчової промисловості після будівництва та простоювання впродовж одного року. За результатами візуального огляду зразка зварних з'єднань чотирьох труб встановлено, що труби, які монтувалися в горизонтальному положенні, у нижній частині мають дефекти зварювання: нерівності шва, напливи, протікання металу. Показано, що зварні з'єднання труб є тривкими проти міжкристалітної корозії, а основний метал – проти пітингової корозії. Пошкодження досліджуваного зразка зварного з'єднання труб, що підтверджено металографічними дослідженнями, викликано несплавленням шва з основним металом, неповним проваром у корені шва, що призвело до наскрізних уражень внаслідок контакту з залишками води після гідравлічних випробувань через щільну корозію. Бібліогр. 17, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: нержавка сталь, зварне з'єднання, потенціометрія, оптична мікроскопія, пітингова корозія, щільна корозія

Вступ. Корозія є складною проблемою при експлуатації зварних виробів з аустенітної нержавкої сталі, зокрема труб, що контактують з водою. Більшість уражень спричинені важко контрольованою локальною корозією. Одним з найнебезпечніших видів корозії є пітингова, що супроводжується утворенням виразок у металі, які починаються з поверхні [1]. Внаслідок складної взаємодії різних чинників корозійний процес має ймовірнісний характер. Пітинг утворюється, якщо пасивну плівку пошкоджено в результаті хімічного або механічного впливу [2]. В основі всіх теорій, які намагаються пояснити ініціацію пітинга, лежить припущення про адсорбцію хлорид-аніону на поверхні металу [3]. У процесі пітингоутворення виділяють три стадії: зародження пітингів, взаємодія між ними та злиття пітингів. Взаємодія пітингів між собою призводить до загасання процесу їх розвитку і пасивації слабких пітингів. Тривкість нержавкої сталі проти пітингоутворення можна оцінити за індексом пітингостійкості – PREN (pitting resistance equivalent) відповідно до рівняння:

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3 \%Mo + k \%N. \quad (1)$$

Наприклад, індекс пітингостійкості для сталі AISI 316 (вміст молібдену 2,0...2,5 %) – 25. Тривкість проти щільної корозії забезпечується при індексі пітингостійкості більше 45 [4]. Молібден покращує корозійну тривкість, особливо у хлоридвмісному середовищі [5].

Чинники пітингової корозії. Під час механічного оброблення металеві частинки нелегованих і низьколегованих сталей можуть потрапляти на

поверхню нержавкої сталі. Вони працюють як мікроаноди в корозійних елементах, в яких катодом є нержавка сталь. У процесі розчинення анодів за наявності в середовищі хлорид-іонів їх локальна концентрація буде зростати за рахунок міграції, а отже, імовірність виникнення пітингової корозії підвищується.

Вплив середовища. Застосування аустенітних нержавких сталей обмежується температурою водного носія близько 50 °C і вмістом хлоридів [3]. Імовірність пітингової корозії аустенітних нержавких сталей, які не містять молібден, у холодній воді підвищується, якщо концентрація хлорид-іонів перевищує 6 ммоль/л [2]. Зміна складу середовища при експлуатації (наприклад, внаслідок шламо- і накипоутворення) сприяє зростанню концентрації хлоридів в осадах, що підвищує ймовірність локальної корозії [3]. Якщо після випробувань тиском залишки води залишаються в системі після зливання, імовірність виникнення пітингів зростає внаслідок випаровування води, що призводить до підвищення концентрації хлоридів [2]. Імовірність пітингової корозії дуже мала у водах з високою швидкістю потоку [2]. У середині пітинга значення рН може дорівнювати 3,5 [6], що сприятиме його розвитку вглиб, імовірно, і в період експлуатації.

Вплив інших речовин. При періодичному змочуванні поверхні нержавкої сталі локальний корозійний процес прискорюється при відносно низьких вихідних концентраціях хлоридів і кисню. Пітинговій корозії може сприяти дефіцит кисню в

Осадчук С.О. – <https://orcid.org/0000-0001-9559-0151>, Ниркова Л.І. – <https://orcid.org/0000-0003-3917-9063>,

Гончаренко Л.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8371-2078>

© С.О. Осадчук, Л.І. Ниркова, Л.В. Гончаренко, 2024

невеликій області. Ця область стає анодною, в той час як зона надлишку кисню – катодною, що викликає місцеву корозію. Продукти корозії заліза є ефективнішими окиснювачами, ніж розчинений у воді кисень. Особливо слід відзначити негативний вплив підвищеного вмісту у воді іонів двовалентного заліза, які при контакті з розчиненим у воді киснем окиснюються і затримуються на поверхні нержавкої сталі у вигляді осаду, що сприяє пітінгоутворенню під осадом [6].

Структура сталі та термічне оброблення. Явно вираженого впливу структурного чинника на пітінгостійкість не встановлено. Локальне утворення фаз фериту та мартенситу в аустенітній матриці може призвести до зародження пітінгів, переважно на границі зерен аустеніт-ферит. Термічне оброблення погіршує опірність пітінговій корозії через можливе виникнення ділянок, збіднених хромом і молібденом [6]. Справедливо вважати, що хімічний склад сильніше впливає на пітінгостійкість, ніж структурний чинник.

Вплив процесу зварювання. Під час процесу зварювання можуть утворюватися оксидні плівки, які значно підвищують імовірність пітінгової корозії. Цього можна уникнути за допомогою методів зварювання та газового захисту, якщо увага приділяється правильному постачанню та очищенню газу. Оксидні плівки, які мають кольори темніше, ніж солом'яний, сильно збільшують імовірність пітінгової корозії. Видалення оксидних плівок виконують шляхом травлення у розчинах без соляної кислоти, тонкого шліфування або дробоструминного оброблення. У критичних умовах (наприклад, залежно від складу матеріалу та температури води) навіть оксидні плівки солом'яного кольору підвищують імовірність пітінгової корозії [2]. При виробництві труб треба враховувати, що властивості сталі під час та після зварювання залежать не тільки від марки сталі, але й від виду термооброблення, що застосовується, умов підготування до зварювання та його виконання [2]. Процес повинен бути описаний у відповідному інспекційному документі.

Способи захисту від пітінгової корозії. Вибір методів захисту від пітінгової корозії залежить від умов експлуатації, особливостей конструкції тощо. Іноді проблеми захисту обладнання від пітінгоутворення можуть бути вирішені використанням сталей із високим вмістом хрому та молібдену; усуненням гетерогенності термообробленням; обробленням поверхні (шліфування, полірування, пасивація); усуненням застійних зон, небажаних контактів різнорідних матеріалів тощо [6].

Щілинна корозія відбувається в середині чи навколо вузького отвору, щілини або проміжку [1], виникає при перерозподілі швидкостей електрохімічних реакцій по поверхні в результаті механічного оброблення поверхні, нещільного з'єднання металевих деталей (непровар зварного шва) у місцях застою розчину, в яких розвиваються корозійні пітінги. У зазорі відбувається витіснення кисню та накопичення агресивних іонів (наприклад, хлоридів), внаслідок чого в області зазору формується анод, а матеріал поза зазором – катод. Далі пасивна плівка руйнується через витіснення кисню, а кислотність в анодній зоні з часом зростає через перебіг корозійних реакцій. Щілинна корозія може прискорюватися в застійних хлоридвмісних середовищах.

Контактна корозія може відбуватися на одному металі внаслідок локальних відмінностей середовища (наприклад, концентрації кисню) або відкладень на металевій поверхні.

Мета роботи полягала у встановленні причин пошкодження зварного трубопроводу з нержавкої сталі AISI 316L, призначеного для транспортування водного середовища, на підприємстві харчової промисловості.

Методи дослідження. Контроль хімічного складу на вміст елементів в основному металі виконували на дифракційному фотоелектричному спектрометрі ДФС-51, у зварних швах – на дифракційному фотоелектричному спектрометрі ДФС-36. Вміст феритної фази визначали магнітним методом за допомогою феритометра МФ-10И на основному металі та зварному шві. Вимірювання потенціалів під краплею, утвореною капіляром діаметром 0,7 мм, проводили в розчині 3%-го NaCl відносно хлоридсрібного електрода порівнянням упродовж 30 хв на різних зонах зварного з'єднання за допомогою цифрового потенціостата-гальваностата MTech PGP-550F.

Схильність до міжкристалітної та пітінгової корозії визначали за стандартними методиками [7, 8]. Середнє число пітінгів на поверхні ділянок зразка визначали неозброєним оком на одиницю площі поверхні (шт/м²). Пітінги по краях зразків не враховували, оскільки їх утворення пов'язано з обробленням країв поверхні.

Металографічні дослідження проводили методом оптичної мікроскопії. Металографічні шліфи виготовляли за стандартною методикою, контролювали глибину руйнування границь зерен та утворення корозійних уражень у поперечному перерізі на мікроскопі NEOPHOT 21 із використан-

ням цифрової камери Allied Vision 1800 U-2050c і програмного забезпечення SEO ImageLAB.

Аналіз проб води за показником рН і вмісту хлоридів проводили за стандартною методикою, на вміст металів, зокрема заліза, міді та ін., – методом ІSP-спектрометрії за допомогою приладу іCAP 6500 DUO Termo E.C.

Окиснювально-відновлювальний потенціал визначали методом потенціометрії із застосуванням платинового електрода та хлоридсрібного електрода порівняння.

$$E_{red/ox} = E + E_{x.c.e.}, \tag{2}$$

де E – виміряна різниця потенціалів між платиновим і хлоридсрібним електродом порівняння, В; $E_{x.c.e.}$ – потенціал хлоридсрібного електрода порівняння, дорівнює +0,23 В.

Аналіз умов поводження з трубами на підприємстві. Будівництво трубопроводів на об’єкті тривало один рік. Згідно з сертифікатом якості труби виготовлені зі сталі аустенітного класу TP.316 L/1.4404, хімічний склад якої відповідав ASTM A240/ EN 10088-2/EN 10028-7, що підтверджено результатами лабораторного контролю хімічного складу зварного з’єднання труб щодо вмісту основних легуючих елементів: основний метал труби зразка зварного з’єднання труб відповідає сталі 1.4404 згідно з EN 10088-2 [9] (табл. 1). Проте метал шва має знижений вміст хрому (17,4 %) та нікелю (8,8 %) і підвищений вміст міді (0,31 %). Відповідно до сертифікату повинно бути 0,150 % міді.

Труби зварено з холоднотягнутого плоского прокату, очищено від окалини до «чистого металу», шорсткість основного металу Ra_{max} становила 0,8 мкм, у зоні зварювання – 1,6 мкм. Труби витри-

мали гідравлічні випробування, неруйнівний контроль, є тривкими проти міжкристалітної корозії.

Труби доставляли автотранспортом, зберігали на складі або одразу проводили зварювання вольфрамовим електродом у захисному газі (аргоні). Після зварювання виконували пасивування поверхні травильною пастою та механічне очищення щітками. Під час будівництва системи трубопроводів відхилень від проєктних рішень не було.

Під час пусконаладжувальних робіт проведено їх гідравлічні випробування підготовленою артезіанською водою тиском не більше 1,1 МПа. Після гідравлічних випробувань воду зливали, але продування труб повітрям з метою осушування не проводили. Перші наскрізні ураження виявлені через один рік після пусконаладжувальних робіт, оскільки внаслідок певних обставин підприємство не працювало і руху води в трубопроводах не було. За спостереженнями більшою мірою уражені труби великих діаметрів у зоні зварних швів у нижній частині труб.

Джерелом водопостачання підприємства є артезіанська вода. Проби води для аналізу відібрані з ємності, в якій вода аналогічна тій, що використовувалася під час гідравлічних випробувань, і зберігалася впродовж одного року (1), до входу у фільтр (2), після виходу з фільтра (3), проби води, що залишалася в трубопроводі впродовж одного року (4) (табл. 2).

За результатами аналізу якості проб води встановлено (табл. 2), що випробувана вода не є агресивною за показником рН (> 4,0 [6]), хлоридів 0,47...3,10 ммоль/л (< 6 ммоль/л [2]), міді 0,001...0,014 мг/л. Проте у дефектах труб за відсутності кисню рівень рН може знижуватися до

Таблиця 1. Хімічний склад зразка основного металу та зварного шва з’єднання труб № 1, 2

Зразок та марка сталі	Масова частка елементів у відсотках						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo
Основний метал труби 1	0,010	0,53	1,20	18,3	11,0	0,33	2,1
Зварний шов 1–2	–	0,51	1,20	17,4	8,8	0,31	2,1
Основний метал труби 2	0,013	0,60	1,57	17,6	10,0	0,32	2,1
Сталь TP.AISI 316L згідно з ASTM A 240/A 240M [10]	0,030	0,75	2,00	16,0...18,0	10,0...14,0	–	2,00...3,00

Таблиця 2. Результати аналізу проб води

Назва показника	Норма згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10 [11]	Проба води			
		1	2	3	4
Водневий показник рН	6,5...8,5 < 4,0*	8,0	6,9	7,5	6,3
Вміст заліза, мг/л	≤ 0,2	0,002	0,105	0,026	170,00
Вміст міді, мг/л	≤ 1,0	0,013	0,001	0,013	0,014
Хлориди: – мг/л – ммоль/л	≤ 250 < 6,0**	16,6 0,47	104,7 2,95	105,6 2,97	110,1 3,10
Окислювально-відновлювальний потенціал, В	–	0,405	0,435	0,442	0,437

Примітка. *Небезпечним є рівень рН < 4 [6]. **Рекомендації EN 12502-4 [2] для холодної води.

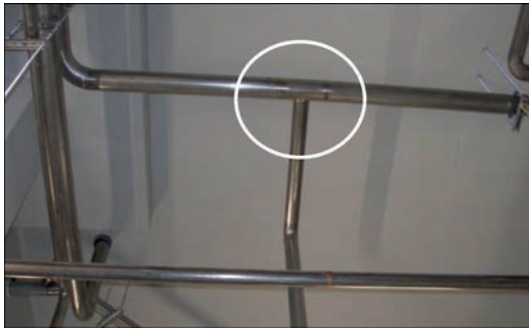


Рис. 1. Ділянка трубопроводу, на якій виявлено наскрізні ураження

небезпечних значень (< 4) внаслідок знекиснення середовища та з часом становити локальну корозійну небезпеку. Оскільки вода знаходилася тривалий час у замкнутому об'ємі системи, про що

свідчить високий вміст заліза (170,0 мг/л), треба припустити знижений вміст кисню, що сприяє зниженню корозійної тривкості труб. Отримані значення окислювально-відновлювального потенціалу 0,405...0,442 В свідчать про слабоокислювальні властивості досліджуваних проб води (згідно з наведеною у роботі [12] класифікацією, 0,400...0,500 В). Припустили, що таке середовище викликає окиснення заліза з пітингів, продукти якого осаджуються на внутрішній поверхні труб, що й спостерігали під час зовнішнього огляду (рис. 2).

Відкладення, відібрані на зварному шві, мали червоне забарвлення, що вказує на присутність продуктів корозії заліза; на основному металі –

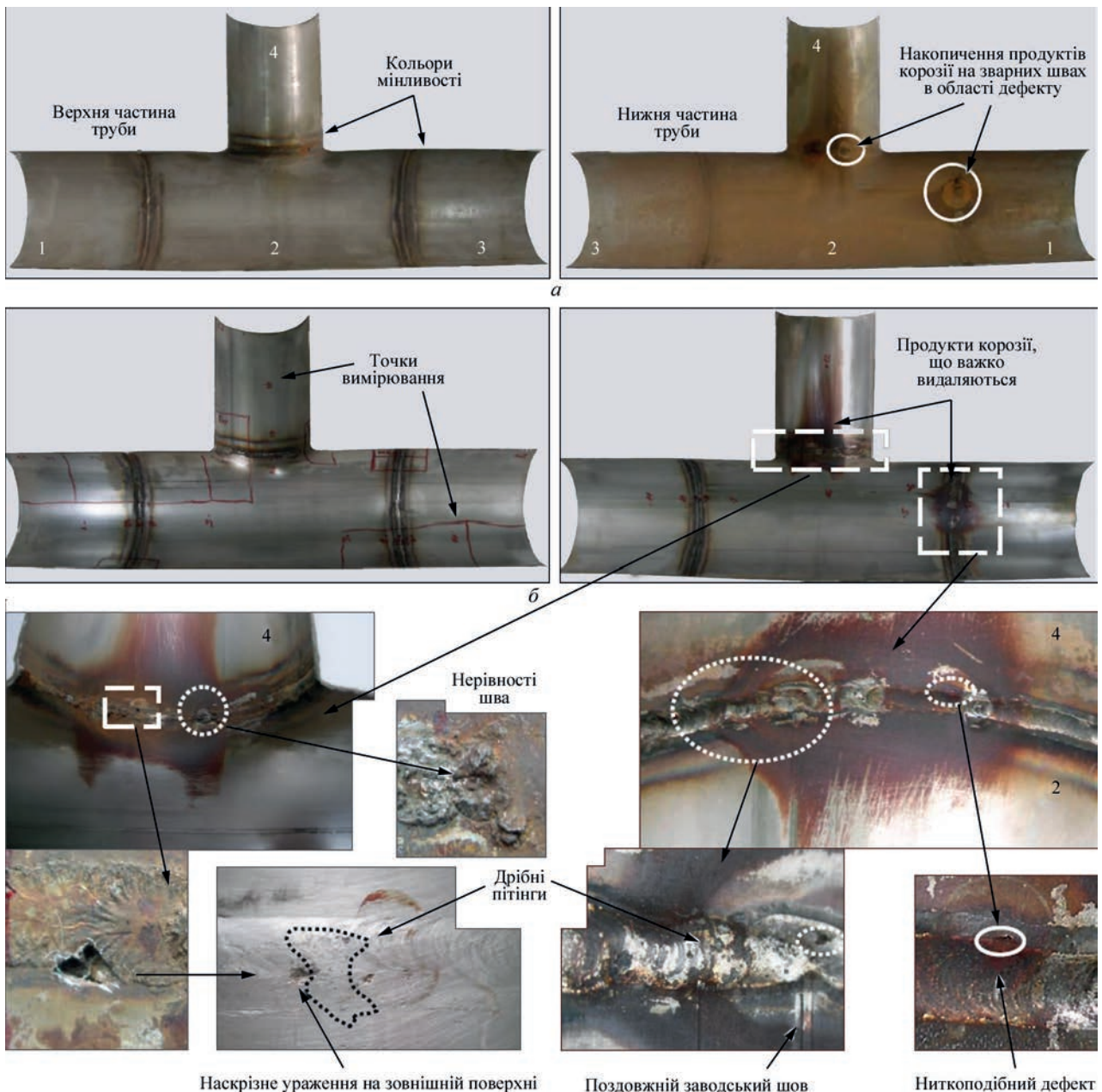


Рис. 2. Зовнішній вигляд зразка зварного з'єднання труб № 1–4: а – внутрішня поверхня з продуктами корозії; б – внутрішня поверхня після видалення продуктів корозії; в – дефекти в області швів

жовтуватий відтінок, що свідчило на присутність, окрім продуктів корозії заліза, більшого вмісту солей твердості (кальцію та магнію) порівняно з відкладеннями, відібраними на зварному шві. З результатів проведеного аналізу усередненої проби, складовими відкладень, які виявлені на внутрішній поверхні зразка, є: залізо (22,9 %), хром (7,19 %), нікель (2,07 %), молібден (0,636 %), мідь (0,375 %), кремній (0,845 %), марганець (0,388 %), що є складовими металу труб. Осад, що утворився з води, містить кальцій (10,1 %) та магній (0,426 %). Осаджень з електролітів іонів більш благородного металу на менш благородний призводить до появи контактної корозії, яка може виникнути і без безпосереднього контакту різнорідних металів, якщо в середовищі присутні більш благородні метали. Наявність міді могла сприяти утворенню локальних пошкоджень труб під продуктами корозії внаслідок різниці потенціалів пар «мідь–нержавка сталь».

Огляд зразків. Для детального дослідження причин утворення наскрізних уражень вирізано зразок із горизонтально розміщеного трубопроводу діаметром 129 мм з товщиною стінки 2,0 мм. Зразок є зварним з'єднанням чотирьох труб (рис. 1), має три зварних шва з магнітними властивостями. Локальні корозійні пошкодження зварних швів спостерігалися в нижній частині труби в більшій мірі, ніж у верхній.

Огляд зразка показав (рис. 2), що з внутрішнього боку в нижній частині труб деякі ділянки мають напливи на основний метал пористого характеру (рис. 2, а). По зоні термічного впливу в нижній частині труби виявлено наскрізний корозійний дефект, а ближче до верхньої частини труб – ниткоподібний початковий дефект по лінії сплавлення.

Внутрішня поверхня основного металу нижньої частини зразка вкрита майже рівномірним шаром осаду світло-бурого кольору, слабо зчепленого з поверхнею. Осад утворився внаслідок тривалого контакту з залишками води. Під осадом на зварному шві виявлено точкові ураження – пітінги, діаметром до 1 мм (рис. 2, а). У верхній частині зразка продукти корозії вкривають поверхню основного металу дуже тонким пілоподібним шаром світло-бурого кольору з жовтуватим відтінком (рис. 2, а).

В області зварного шва наявні товстіші шари продуктів корозії червоно-бурого кольору, місцями нарости продуктів корозії, які утворилися під час наскрізного руйнування. По обидва боки зварних швів видно смуги кольорів мінливості від світлого (темніше солом'яного) до темного (коричнево-

го та синього) відтінків, що утворилися в процесі зварювання (рис. 2, а, б). Ширина смуг кольорів мінливості 15...20 мм. На смугах кольорів мінливості після змивання залишається тонкий шар осаду світлого кольору, який важко видаляється. Зварний шов має нерівності, напливи, що є дефектами зварювання, і на яких затримувалися продукти корозії.

Після видалення осаду мийним засобом поверхня є блискучою, металевого кольору, на ній наявні наскрізні ураження в області зварних швів у вигляді точок та тріщин діаметром до 1 мм (рис. 2, в). Наприклад, наявне ураження в зоні перекриття ділянок зварного шва під час зварювання та лазерного поздовжнього шва, наскрізне ураження приблизно до 2 мм (рис. 2, в).

За результатами візуального огляду зразків зварних з'єднань труб встановлено, що труби, які монтувалися в горизонтальному положенні, у нижній частині мають дефекти зварювання: нерівності шва, напливи, протікання металу. Виявлено шар відкладень внаслідок наявності залишків води впродовж одного року. Наскрізні корозійні ураження відмічено в нижній частині труб. Згідно з ГОСТ 9.908 [13] ідентифіковано вид корозії, що призвела до наскрізних уражень труб: внутрішня, щільна в дефектах зварних швів.

Визначення гетерогенності зварних з'єднань труб. Відомо, що метал має аустенітну структуру, якщо кількість феритної фази не більше 10 % [14]. Феритна фаза (дельта-ферит, ферит), яка може утворитися під час зварювання, виникає при кристалізації з рідкого стану хромонікелевих сталей аустенітного та аустенітно-феритного класу [15], має об'ємноцентровану кубічну кристалічну ґратку. Високий вміст феритної фази вказує на схильність аустенітної нержавкої сталі до окрихчення.

За результатами визначення гетерогенності зварних з'єднань методом феритометрії (рис. 3, крива 1, 2) встановлено, що метали труб і зварних швів відрізняються вмістом феритної фази, яка у зварних швах становить 4,0...13,0 %, у зоні термічного впливу – 0...2 %, в основному металі – 0. Різниця потенціалів між основним металом і зварним швом, визначена методом потенціометрії, становить від 0,094 В (з'єднання 1–2) до 0,215 В (з'єднання 2–3) (рис. 3, крива 3). У зварних конструкціях різниця потенціалів між зварним швом і основним металом не має перевищувати 30...50 мВ [16]. Різниця вмісту феритної фази в основному металі труб і зварному шві стала причиною електрохімічної гетерогенності зварного з'єднання.

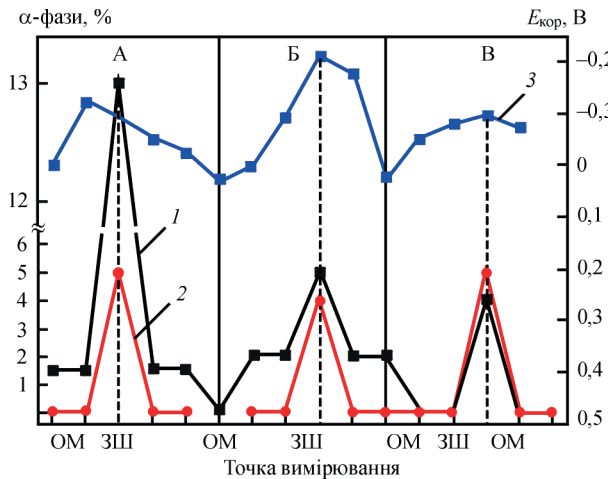


Рис. 3. Вміст феритної фази з боку зовнішньої (1) та внутрішньої (2) поверхні, розподіл потенціалів корозії по внутрішній поверхні (3) зразка труби. А, Б, В – з'єднання труб 1–2, 2–3, 2–4 відповідно (рис. 2): ЗШ – зварний шов, ОМ – основний метал

Таким чином, відмінності фазового складу основного металу труб і зварного шва створюють електрохімічну гетерогенність, що підтверджено виміряними потенціалами корозії.

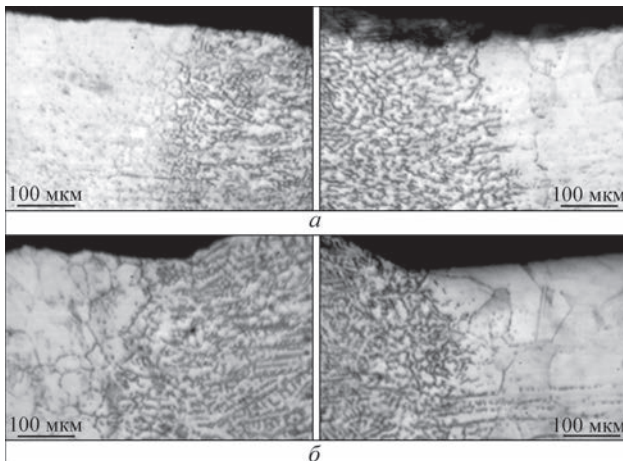


Рис. 4. Фотографії мікрошліфів зварного з'єднання труб до корозійних випробувань (а) і після випробувань тривкості проти міжкристалітної корозії (б), $\times 100$

Тривкість проти локальної корозії. У результаті випробування відповідно до ДСТУ ISO 3651-2 (6.1. Метод А) [7] показано, що зварні з'єднання труб є тривкими проти міжкристалітної корозії – міжкристалітних тріщин не виявлено (рис. 4).

Оскільки робоча поверхня зразків – внутрішня та контактує з корозійним середовищем, пітінгостійкість після прискорених випробувань [8] (ГОСТ 9.912) оцінювали за числом пітінгів, що утворилися на внутрішній поверхні (рис. 5).

Пітінги на зварному шві, що утворилися в процесі експлуатації та отримали розвиток під час прискорених випробувань, не враховували. Найбільші пітінги (діаметром до 1,5 мм) наявні на гнутій частині основного металу труби 4 на відстані 1,5...2 мм від зварного шва. Через 72 год випробувань основний метал труб локальних уражень не має. Натомість через 24 год середнє число пітінгів на одиницю площі внутрішньої поверхні для з'єднань 1–2, 2–3, 2–4 становило 740 (ЗТВ), 341 (ОМ) і 2308 (ЗТВ) шт/м² відповідно. Через 72 год випробувань кількість пітінгів не змінилася, що вказувало на ймовірний їх розвиток вглиб товщини металу. Загалом основний метал труб зразка є тривким проти пітінгової корозії. Проте кільцевий шов, зона термічного впливу та заводський шов схильні до пітінгової корозії. З часом під дією експлуатаційних чинників внаслідок зниження захисної здатності оксидної плівки на поверхні можливий розвиток пітінгової корозії.

Металографічні дослідження зварних з'єднань зразка у поперечному перерізі показали (рис. 6, 7), що основний метал має аустенітну структуру. Структура металу шва має стовбчастий характер, відповідає типовій структурі для металу шва, виконаного на сталі аустенітного класу. Розмір зерна, визначений відповідно до ДСТУ ISO 643 [17], має номер 5–6 для основного металу та 8–9 – для зварного

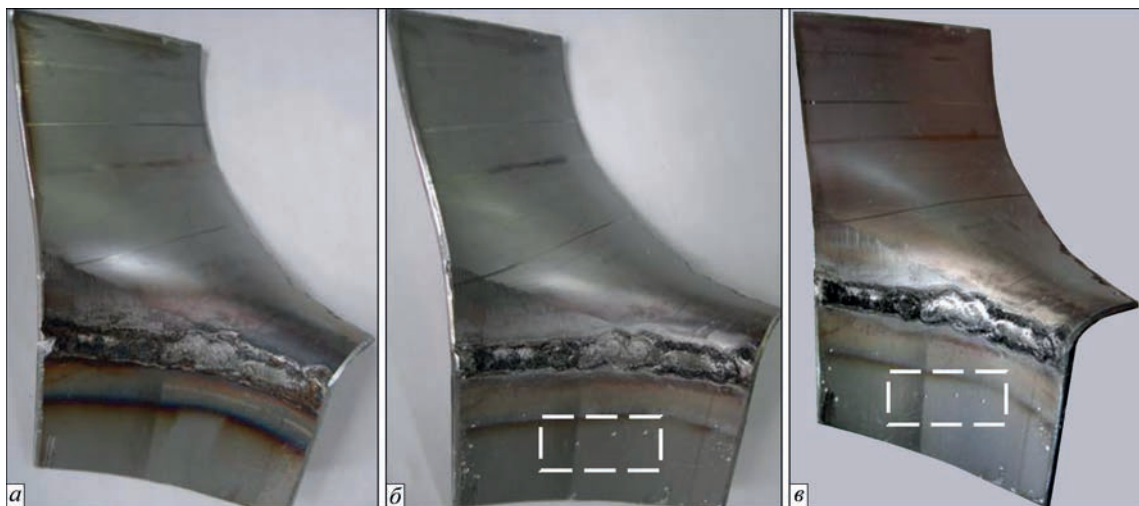


Рис. 5. З'єднання труб до випробувань тривкості проти пітінгової корозії (а) та після випробувань впродовж 24 год (б), 72 год (в)

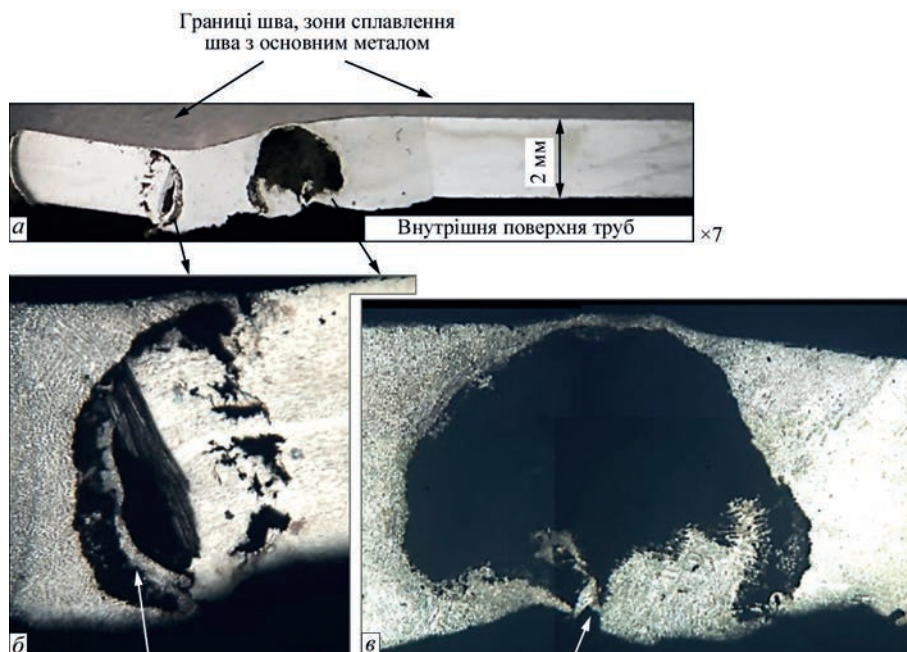


Рис. 6. Наскрізні дефекти у шві: *а* – поперечний переріз зразка, $\times 7$; *б* – несплавлення шва з основним металом, корозія, $\times 27$; *в* – непровар кореня шва, корозія металу шва у порожнині з боку внутрішньої поверхні, $\times 27$

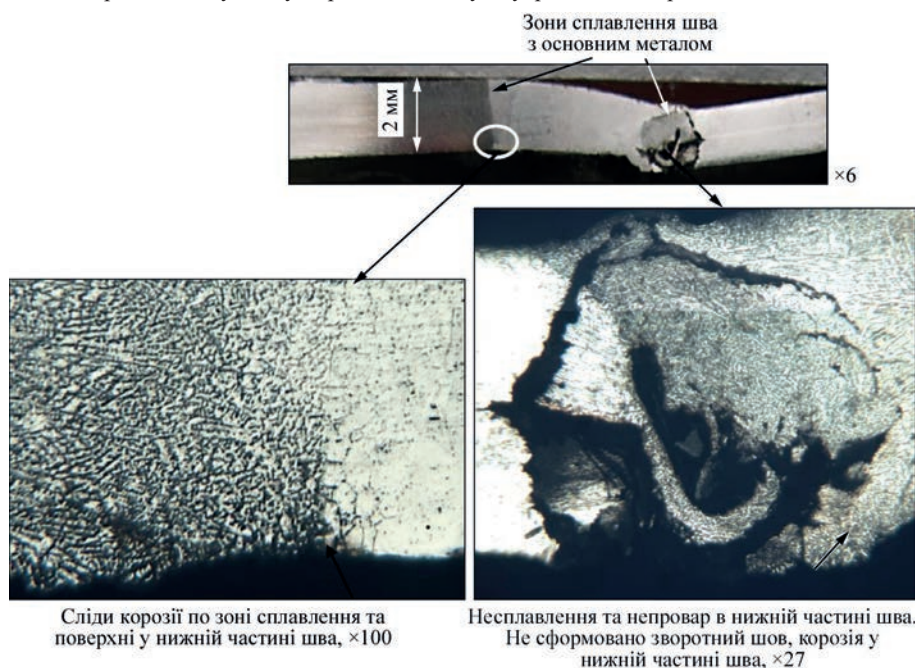


Рис. 7. Наскрізний дефект (частина порожнини) по зоні сплавлення

шва. У зварних з'єднаннях виявлено несутцільності у вигляді порожнин розміром до 2,2 мм, які виникли через несплавлення шва з основним металом, неповного провару в корені шва, що призвело до наскрізних уражень внаслідок контакту з залишками води. Проте корозійні пошкодження з боку внутрішньої поверхні в зоні кореня шва завглибшки до 0,15 мм не є основною причиною руйнування труб.

Висновки

За результатами дослідження встановлено, що наскрізні ураження на внутрішній поверхні зразка зварного з'єднання труб зі сталі AISI 316L обу-

мовлені взаємодією комплексу чинників, а саме: наявністю дефектів зварного з'єднання внаслідок непровару в корені шва; розвитком щілинної корозії при тривалому контакті впродовж одного року з залишками води після пусканалагоджувальних робіт при простоюванні підприємства, під час якого руху води в трубопроводах не було. Наголошено, що властивості сталі під час і після зварювання залежать не тільки від марки сталі, а також і від умов підготування до зварювання та його виконання.

Список літератури

1. ДСТУ 3830-98 *Коррозія металів і сплавів. Терміни та визначення основних понять.*

2. BS EN 12502-4:2004 *Protection of metallic materials against corrosion – Guidance on the assessment of corrosion likelihood in water distribution and storage systems – Part 4: Influencing factors for stainless.*
3. Martins, C.M.B., Moreira, J.L., Martins, J.I. (2014) Corrosion in water supply pipe stainless steel 304 and a supply line of helium in stainless steel 316. *Engineering Failure Analysis*, **39**, 65–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.017>
4. Degremont® *water handbook. stainless steel*. <https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/corrosion-in-metal-and-concrete/corrosion-in-metallic-materials/stainless-steel>.
5. ДСТУ EN 10088-1:2019 *Сталі нержавкві. Частина 1. Перелік нержавквих сталей* (EN 10088-1:2014, IDT)
6. Сокол И.Я., Ульянов Е.А., Фельдгандлер Э.Г. и др. (1989) *Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас. Справ. изд.* Москва, Металлургия.
7. ДСТУ EN ISO 3651-2:2005 *Сталі корозійнотривкі. Визначення тривкості до міжкристалічної корозії. Частина 2. Феритні, аустенітні та феритно-аустенітні (двофазні) сталі. Випробування на корозію у сірчанокислотних середовищах* (EN ISO 3651-2:1998, IDT).
8. ГОСТ 9.912-89 *Единая система защиты от коррозии и старения. Сталь и сплавы коррозионностойкие. Методы ускоренных испытаний на стойкость к питтинговой коррозии*.
9. EN 10088-2:2005 *Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes*.
10. ASTM A 240/A 240M-04 *Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications*.
11. ДСанПіН 2.2.4-171-10 *Державні санітарні норми та правила. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною*.
12. Третьякова О.И. (2013) *Избранные лекции по химии почв. Учебно-методическое пособие*. Краснодар.
13. ГОСТ 9.908-85 ЕСЗКС. *Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости*.
14. Каховский Н.И. (1975) *Сварка высоколегированных сталей*. Техніка.
15. ДСТУ EN ISO 8249:2019 *Зварювання. Визначення феритної фази (FN) у металі зварного шва аустенітних і дуплексних феритно-аустенітних Cr–Ni нержавквих сталей* (EN ISO 8249:2018, IDT; ISO 8249:2018, IDT).
16. ГОСТ 9.005-72 *Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами*.
17. ДСТУ ISO 643:2009 (ISO 643:2003, IDT) *Сталі. Мікрографічний метод визначення видимого розміру зерна*.
2. BS EN 12502-4:2004 *Protection of metallic materials against corrosion – Guidance on the assessment of corrosion likelihood in water distribution and storage systems – Pt 4: Influencing factors for stainless steels*.
3. Martins, C.M.B., Moreira J.L., Martins J.I. (2014) Corrosion in water supply pipe stainless steel 304 and a supply line of helium in stainless steel 316. *Engineering Failure Analysis*, **39**, 65–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.017>
4. Degremont® *water handbook. stainless steel*. <https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/corrosion-in-metal-and-concrete/corrosion-in-metallic-materials/stainless-steel>.
5. DSTU EN 10088-1:2019 *Stainless steels – Pt 1. List of stainless steels* [in Ukrainian].
6. Sokol, I.Ya., Ulyanin, E.A., Feldgandler, E.G. et al. (1989) *Structure and corrosion of metals and alloys: Atlas. Ref. ed.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
7. DSTU EN ISO 3651-2:2005 *Corrosion resistant steels. Determination of resistance to intergranular corrosion. Pt 2. Ferritic, austenitic and ferritic-austenitic (duplex) steels. Corrosion test in media containing sulfuric acid* (EN ISO 3651-2:1998, IDT) [in Ukrainian].
8. GOST 9.912-89 *Unified system of corrosion and protection ageing. Corrosion-resistant steels and alloys. Method of accelerated tests for resistance to pitting corrosion* [in Russian].
9. EN 10088-2:2005 *Stainless steels. Pt 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes*.
10. ASTM A 240/A 240M-04 *Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications*.
11. DSanPiN 2.2.4-171-10 *National sanitary standards and regulations. Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption* [in Ukrainian].
12. Tretjakova, O.I. (2013) *Selected lectures on soil chemistry: Educational and methodological manual*. Krasnodar [in Russian].
13. GOST 9.908-85 ESZKS *Metals and alloys. Methods for determination of corrosion and corrosion-resistance indices* [in Russian].
14. Kakhovsky, N.I. (1975) *Welding of high-alloyed steels*. Tekhnika [in Russian].
15. DSTU EN ISO 8249:2019 *Welding. Determination of Ferrite Number (FN) in austenitic and duplex ferritic-austenitic Cr–Ni stainless steel weld metals* (EN ISO 8249:2018, IDT; ISO 8249:2018, IDT) [in Ukrainian].
16. GOST 9.005-72 *Unified system of protection against corrosion and aging. Metals, alloys, metallic and non-metallic inorganic coatings. Permissible and impermissible contacts with metals and non-metals* [in Russian].
17. DSTU ISO 643:2009 (ISO 643:2003, IDT) *Steels. Micrographic method of determining the apparent grain size* [in Ukrainian].

References

1. DSTU 3830-98 *Corrosion of metals and alloys. Terms and definitions of basic concepts* [in Ukrainian].

CAUSES OF DAMAGE TO A PIPELINE OF AISI 316L STEEL

S.O. Osadchuk, L.I. Nyrkova, L.V. Goncharenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: lnyrkova@gmail.com

A damaged pipeline of stainless AISI 316L steel for cold water transportation, at a food industry enterprise after construction and stoppage for one year was investigated. A visual inspection of the specimens of welded joints of four pipes established that the pipes, mounted in a horizontal position, have the following welding defects in the lower part: weld irregularities, overlaps and metal leakage. It was shown that the welded pipe joints are durable against intergranular corrosion, and the base metal is resistant to pitting corrosion. The damage to the examined specimen of the welded pipe joint, which was confirmed by metallographic examinations, was caused by non-fusion of the weld with the base metal and partial penetration at the weld root, which led to through damages due to contact with residual water after hydraulic tests as a result of crevice corrosion. 17 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Keywords: stainless steel, welded joint, potentiometry, optical microscopy, pitting corrosion, crevice corrosion

Отримано 26.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 29.04.2024

Прийнято 04.06.2024