

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН РУЙНУВАННЯ ПЛАСТИНЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННИКА З НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ AISI 316L У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

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

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

Проведено комплекс досліджень причин руйнування пластинчастого теплообмінника з нержавіючої сталі AISI 316L. Із застосуванням аналізу умов експлуатації, методів сканувальної мікроскопії, візуального огляду, масометрії, фізичних методів аналізу середовищ, випробувань стійкості проти локальної корозії встановлено причини утворення наскрізних пошкоджень пластин теплообмінника. Доведено, що ініціювання наскрізних дефектів обумовлено складною взаємодією комплексу чинників, а саме: руйнуванням пасивної плівки в місцях стикання пластин, розвитком міжкристалітної корозії поверхневого шару при тривалому простоюванні теплообмінника з дезінфікуючою консервуючою рідиною, що призвело до утворення застійних зон між гофрами пластин, притиснених одна до одної, в яких затримувалася рідина, та підвищення корозивності води відносно сталі. Бібліогр. 22, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: нержавіюча сталь, теплообмінник, пітингова корозія, опірність до локальної корозії, швидкість пітингової корозії

Вступ. Корозійні збої теплообмінників є дуже поширеним явищем, подолання наслідків якого вимагає великих витрат на технічне обслуговування або ремонт [1]. Відмови в їх роботі обумовлені в основному локальною корозією: пітинговою, щілинною, корозійним розтріскуванням.

Так, комплексний аналіз пошуку причин внутрішнього витоку пластин 316L у пластинчастому теплообміннику, який працював на когенераційній електростанції, показав, що несправності викликані утворенням напівсферичних перфорацій, рівномірно розподілених у місцях стикання зигзагоподібних вершин сусідніх гофрованих пластин. Там, де поверхнева пасивна плівка пошкоджена тертям, спочатку розвивається щілинна та пітингова корозія, у міру зростання розміру пітинга – щілинна та фретинг-корозія, що викликають розвиток ураження навколо дефекту, пітингова та щілинна корозія – розвиваються у глибинному напрямку. У вузькій щілині накопичується багато продуктів корозії, зокрема Cl^- , а напруження стиску викликає тертя із коливаннями тиску води [2].

Випробування методами потенціометрії та електрохімічної циклічної поляризації підтвердили сприйнятливості пластин SS 316L теплообмінного обладнання на текстильній фабриці до інтенсивнішої пітингової корозії в живильній воді відкритого контуру та воді кожуха двигуна через високий рівень вмісту хлоридів [3].

У нафтохімічному комплексі Jam (Іран) пластини зі сталі 316 деяких теплообмінників були пошкоджені через появу тріщин у місцях встановлення прокладок [4] внаслідок накопичення хло-

рид- та сульфід-іонів у щілинах між пластинами та прокладками, що при високій температурі призвело до корозійного розтріскування пластин.

У системі централізованого теплопостачання утворення дефектів проточної пластини з нержавіючої сталі AISI 316 пластинчастого теплообмінника спричинені пітинговою корозією, оксидними відкладеннями та забрудненнями в місцях регулярного контактування сусідніх пластин [5]. Поверхневі оксиди та забруднення містили вуглець, кремній і магній, що входять до складу хімічних клеїв. Концентрація іонів хлориду складала 30...40 ppm, що не становило небезпеки для розвитку пітингової корозії. У щілині відбувалося локальне зменшення розчиненого кисню разом зі збільшенням вмісту хлорид-іонів, утворюючи кисле середовище. Таке середовище руйнує пасивну плівку нержавіючої сталі, що призводить до утворення пітингів. Крім того, забруднювачі звузили проміжок між сусідніми пластинами та перешкоджали дифузії іонів, тим самим прискорюючи щілинну корозію.

Причиною утворення наскрізних дефектів пластини теплообмінника під час роботи обладнання в середовищі з іонами хлору та сірки, як стверджують автори [6], є розвиток корозії в області фериту, який смугоподібно розподілений в аустенітній матриці.

Причиною несправності теплообмінників у нафтовій та нафтохімічній галузях відзначено дефекти виготовлення та зварювання, наявність залишкових напружень, невідповідний вибір матеріалів і дизайн, неправильний хімічний склад/потік води

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

Л.В. Гончаренко – <https://orcid.org/0000-0001-8371-2078>, В.А. Костін – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>

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

та незадовільний вибір фільтрів, наявність Cl^- , S^{2-} , O_2 , NH_4^+ у воді, недотримання рекомендованих умов експлуатації та стандартних рекомендацій під час зупинки [7].

Робота теплообмінників в умовах забруднення пластин осадам з води призводить до їх локальної корозії під осадом [8]. За рівних умов роботи теплообмінні пластини зі сталі AISI 316L пропрацювали в 2,36 рази довше, ніж зі сталі AISI 304L. Корозійне руйнування пластин під осадом почалося із зародження пітингу поблизу неметалевих включень.

Причиною передчасного виходу з ладу пластини теплообмінника зі сталі 316/316L на харчовому заводі виявлено наявність поверхневих домішок, що містять хлориди [9]. Характерною особливістю поверхні рифленої пластини є вторинно рекристалізована мікроструктура з товстими та чітко вираженими границями зерен аустеніту. Пітингоутворення визначено домінуючим механізмом руйнування матеріалу, спричинене фреттинг-корозією сусідніх ребер пластини.

Мартенситне перетворення, яке відбувається внаслідок процесу холодного формування сталі AISI 316 та в умовах циклічного навантаження, має істотний вплив на корозійну стійкість пластинчастих теплообмінників з аустенітної нержавіючої сталі AISI 316 [10]. Роль молібдену в пасивній плівці полягає у його здатності утворювати нерозчинні хлоридні комплекси на дні пітингів. Проте захисна плівка при пасивації або репасивації постійно руйнується через безперервне мартенситне перетворення в результаті циклічної роботи пластинчастого теплообмінника внаслідок його вібрації та деформації, які можуть призвести до розвитку тріщин або руйнування. При мартенситному перетворенні внаслідок холодної пластичної деформації змінюється структура сталі та її фізико-хімічні властивості. Набуття сталлю магнітних властивостей дуже залежить від легуючих елементів. Маючи інші потенціали корозії, вони легко стають анодом або катодом у корозійному напівелементі.

На швидкість корозії впливає теплопередача, основним чинником якої є градієнт температур, що викликає відмінності в розчинності елементів у рідині. Залежно від того, нагрівається чи охолоджується рідина, цей градієнт може прискорювати

або гальмувати корозію. Корозія негативно впливає на теплогідрравлічні характеристики теплообмінників. Продукти корозії можуть перешкоджати потоку та сприяти збільшенню перепаду тиску.

З аналізу великої кількості несправностей, наведених у літературі, зрозуміло, що існує необхідність подальших наукових досліджень у напрямку розроблення корозійностійких матеріалів для різних середовищ [11–13], розширення досліджень зниження швидкості корозії із застосуванням електрохімічних методів (катодний або анодний захист), пошуку альтернативних підходів щодо вдосконалення конструкції теплообмінника таким чином, щоб пошкоджені корозією пластини було легко замінити [14, 15].

Мета роботи полягала у дослідженні причин руйнування пластинчастого теплообмінника з нержавіючої сталі у водному середовищі на підприємстві харчової промисловості.

Методи дослідження. Дослідження причин виходу з ладу теплообмінників передбачає застосування комплексного підходу, який включає аналіз умов монтажу та експлуатації виробу, транспортованого середовища, проведення комплексу лабораторних досліджень з оцінювання властивостей пластин, їх опірності до локальної корозії, детальне вивчення області дефектів.

Досліджували три пластини з нержавіючої сталі: непошкоджену після 8 років експлуатації, після 1 року експлуатації з ненаскрізними та наскрізними ураженнями, товщина яких становила 0,8, 0,5 і 0,5 мм відповідно, хімічний склад яких визначено на спектрометрі «Spectrovac-1000» (табл. 1).

Випробування опірності до пітингової корозії проводили відповідно до [17] у 10%-му розчині заліза трихлорида гексагідрату ($\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$) за кімнатної температури впродовж 24 год. Зразки виготовляли з пластин теплообмінника з ділянок, на яких присутні кутоподібні та ромбоподібні тиснення.

Середню умовну швидкість пітингової корозії в $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ визначали за формулою:

$$v_{\text{кор}} = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}$$

де $v_{\text{кор}}$ – середня умовна швидкість пітингової корозії, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; Δm – втрата маси зразка, г; S – площа поверхні зразка, м^2 ; τ – тривалість випробувань, год.

Таблиця 1. Хімічний склад пластин

Характеристика зразка	Масова частка елементів, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	S	P
Після 8 років експлуатації	0,027	0,36	1,28	17,0	11,1	0,29	2,0	<0,1	0,002	0,027
Після 1 року експлуатації	0,031	0,34	1,21	17,2	11,7	0,33	2,1	<0,1	0,002	0,025
AISI 316L згідно з ASTM A 240/A 240M [16]	0,03	0,75	2,00	16,0...18,0	10...14	–	2,0...3,0	–	0,030	0,045

Середнє число пітінгів на поверхні ділянок зразка визначали неозброєним оком на одиницю площі поверхні (шт/м²).

Для дослідження поверхні зразків в області точкових дефектів використовували методи растрової електронної мікроскопії та мікрорентгеноспектрального аналізу. Дослідження проводили на електронному мікроскопі JSM 840 (JEOL, Японія) і енергодисперсійному мікроаналізаторі Link 860/500 (Link Analytical, Великобританія). Вивчення поверхні виконували в режимі вторинних (SEI) і зворотнорозсіяних електронів (BEI) за напруги прискорення 20 кВ і струмі електронного пучка 10⁻⁷...10⁻¹⁰ А.

Мікротвердість за Віккерсом визначали згідно з ГОСТ 2999 [18] на різних ділянках зразка на мікротвердомі M-400 фірми LECO (США) при навантаженні 100 г.

Результати досліджень та їх обговорення.
Аналіз умов експлуатації. Теплообмінник з паралельним потоком призначений для пастеризації пива, яка здійснюється за допомогою води, містив пакет гофрованих сталевих пластин з отворами. До початку експлуатації пластини теплообмінника зберігали впродовж ~16 років. Максимальна температура транспортованих води та пива в теплообміннику 78 °С, тиск 10 бар, перевищень робочих допустимих значень яких не було. Проведені випробування на герметичність надлишковим тиском за допомогою вуглекислого газу з однієї сторони та атмосферним тиском з іншої не перевищували 6 бар. Промивання пластин проводили підготовленою гарячою водою з температурою 80 °С та розчинами, що не містять хлоридів. Тривалість роботи теплообмінника до утворення наскрізних уражень становила 1 рік, тривалість контакту з водою (пивом) – приблизно 4400 год. Натомість теплообмінник, встановлений раніше, працював 8 років без відмов.

Корозійні ураження виявлені у виробничих умовах з боку контакту пластини з пивом. На більшості пластин наявні пітінги. Наскрізні ураження виявлено лише на деяких пластинах. Під час експлуатації теплообмінника з наскрізними ураженнями були декілька зупинок, усього впродовж 1 року експлуатації 4400 год, тобто загалом більше ніж 0,5 року. При цьому теплообмінник заповнювали холодною водою з кислотним засобом для дезінфекції, дозволим в харчовій промисловості, з рН 6,3...6,8. Аналогічним було

оброблення теплообмінника, який не мав наскрізних уражень. Таким чином, одне простоювання обладнання продовжувалося не менше ніж декілька днів. Треба зазначити, що ймовірність пітінгової корозії дуже мала у водах з високою швидкістю потоку [19].

Аналіз властивостей середовищ. Результати аналізу проби води та пива показали, що водневий показник рН пива до та після теплообмінника не змінився і становив 4,4 при незначній зміні електропровідності: від 922 до 1022 мкСм/см (в 1,1 рази). Натомість кислотність води збільшилася (від 4,4 до 3,6) на 0,8 одиниць рН, електропровідність (від 434 до 604 мкСм/см) – в 1,4 рази. Це свідчить про підвищення корозивності води відносно нержавіючої сталі при рН 4,0 і менше [20].

Візуальний огляд в лабораторних умовах показав, що на поверхні гофрованих ребер всіх пластин наявні ромбовидні потертості від стискання розміром приблизно 1×1 мм з кроком ~ 20 мм (рис. 1) та пітінги.

За вмістом основних легувальних елементів метал пластин відповідає сталі AISI 316L. Проте вміст вуглецю у зразках після 1 року експлуатації дещо більше (0,031 %), ніж нормоване значення (0,03 %), на відміну від зразка після 8 років експлуатації, в якому вміст вуглецю 0,027 % (табл. 1). Стійкість пластин теплообмінника проти міжкристалітної корозії підтверджено випробуваннями методом Штрауса [21].

Стійкість нержавіючої сталі проти пітінгоутворення оцінили за індексом пітінгостійкості – PRE (pitting resistance equivalent) відповідно до рівняння: $PRE = \% Cr + 3,3 \times \% Mo + k \times \% N$ (для сталей аустенітного класу $k = 30$) [22]. За цим показником пластини приблизно однакові (сталь стійка проти пітінгоутворення, якщо PRE більше 35 [22]), але для пластини після 8 років експлуатації властиве більше співвідношення Cr/Ni (табл. 2).



Рис. 1. Ділянка поверхні пластини з ромбовидними потертостями

Таблиця 2. Індекс пітінгостійкості для сталі досліджуваних пластини

Характеристика зразка	Cr	Ni	Mo	PRE	Cr/Ni
Після 8 років експлуатації	17	11,1	2	23,6	1,53
Після 1 року експлуатації	17,2	11,7	2,1	24,1	1,47

Дослідження опірності пластин пітинговій корозії. З аналізу зовнішнього вигляду зразків (рис. 2) видно, що пітинги утворювалися переважно на випуклих ділянках зразків, що зазнали холодного деформування під час виготовлення (рис. 2, *е*) та в місцях, в яких пластини теплообмінника стикалися одна з одною, що призвело до порушення суцільності пасивного шару. В цих місцях утворилися ненаскрізні пітинги, але з часом внаслідок електрохімічної гетерогенності між дном пітинга та поверхнею пластини ймовірним є подальший розвиток активних пітингів до утворення наскрізного дефекту. Зроблено висновок, що однією з причин утворення пітингів є порушення суцільності пасивної плівки внаслідок контакту випуклих частин теплообмінника між собою. Оцінювання середньої умовної швидкості пітингової корозії та кількості пітингів на одиницю площі виявило відмінності в кількості пітингів на одиницю площі при близьких значеннях умовної швид-

кості корозії, що імовірно обумовлені різницею їх розвитку вглиб чи по поверхні (табл. 3).

Дослідження області локальних корозійних дефектів. Як виявлено (рис. 3–5), мікроструктура всіх зразків аустенітна зі слідами деформації всередині зерен, що обумовлено деформуванням пластин під час виготовлення. Мартенсит деформації на ділянці дефекту відсутній. Мікротвердість $HV_{0,1}$ становить 199...236 кгс/мм², що відповідає мікротвердості аустенітної матриці. Дефектів у вигляді подряпин, відшарувань поверхневого шару не виявлено. На всіх зразках відмічено розтравлення границь аустенітних зерен на поверхні, що ймовірно обумовлено впливом середовища під час експлуатації. Дослідження методом енергодисперсійного мікроаналізу вмісту легувальних елементів хрому та нікелю в області пітингів та на відстані від нього на неуразеній поверхні показав наявність незначних відмінностей (табл. 4), що не є визначальним в утворенні пітингів.

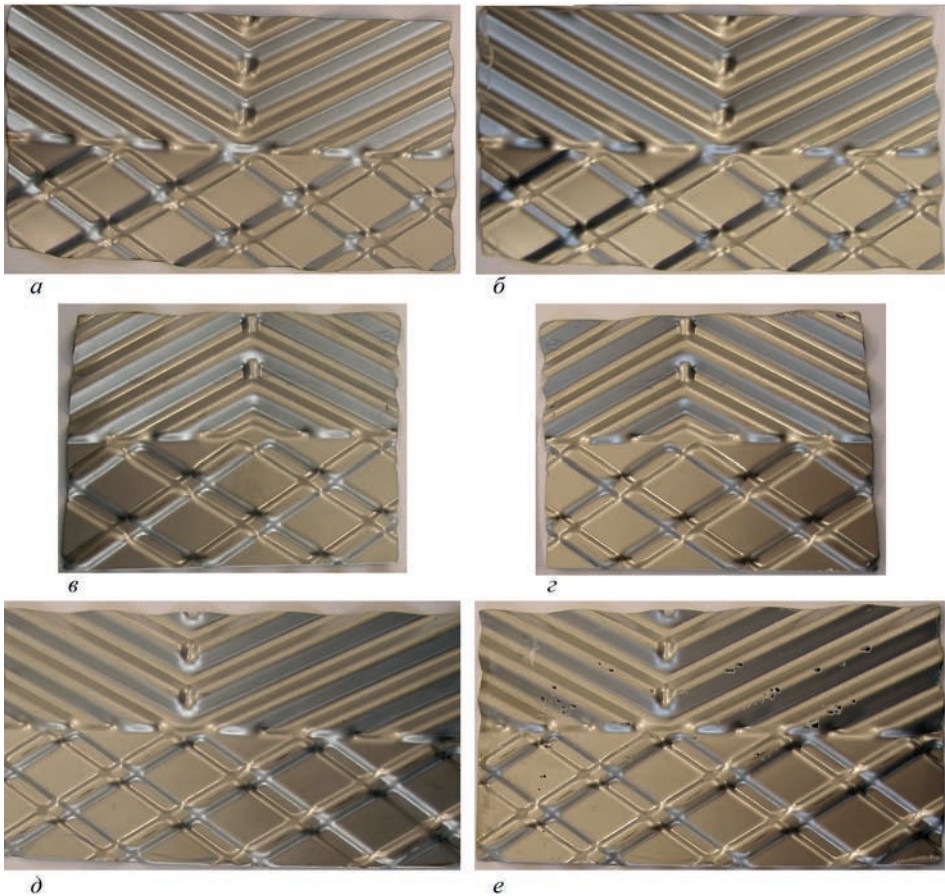


Рис. 2. Зовнішній вигляд поверхні зразків, вирізаних з пластин теплообмінника після експлуатації впродовж 8 років (*а, б*), 1 року без наскрізних пітингів (*в, г*) та з наскрізними пітингами (*д, е*): *а, д* – до випробувань; *б, г, е* – після випробувань тривалості проти пітингової корозії

Таблиця 3. Середня умовна швидкість пітингової корозії

Вид пластини	Характеристика пластин	Середня умовна швидкість пітингової корозії, мм/рік	Кількість пітингів, шт/м ²
Після експлуатації 8 років	Без пітингів	$1,28 \cdot 10^{-4}$	45
Після експлуатації 1 рік	Без пітингів	Середнє $1,25 \cdot 10^{-4}$	460
	З наскрізними пітингами	Середнє $1,65 \cdot 10^{-4}$	550

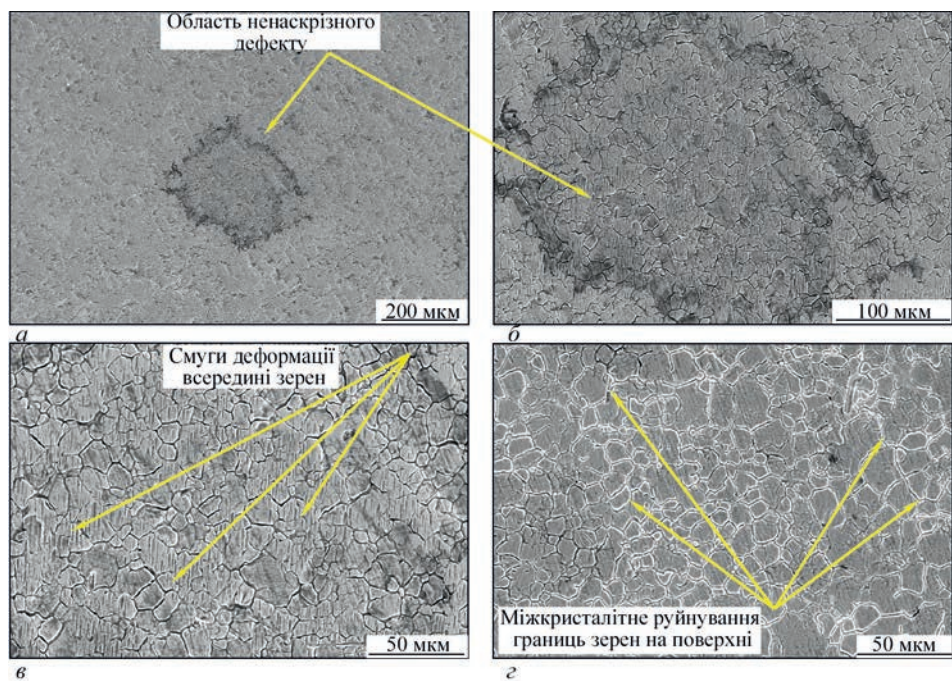


Рис. 3. Вигляд поверхні зразка теплообмінника після 8 років експлуатації в області локального руйнування пасивного шару (а, б) та мікроструктура на ділянці дефекту (в), на відстані від дефекту (г)

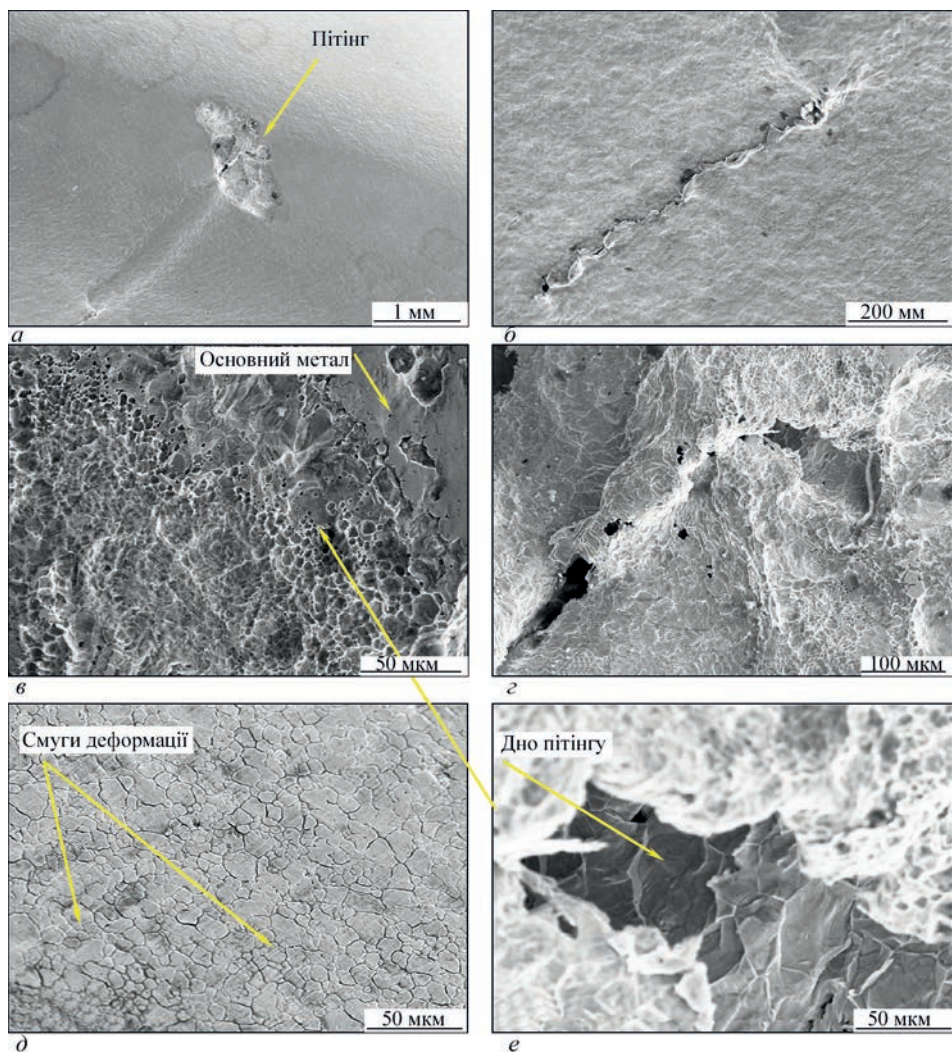


Рис. 4. Вигляд поверхні зразку пластини після 1 року експлуатації з ненаскрізними дефектами та структура на різних ділянках: а – пітінг; б – тріщина; в – дно пітінгу; г – береги дефекту; д – основний метал на відстані від дефекту; е – дно пітінгу

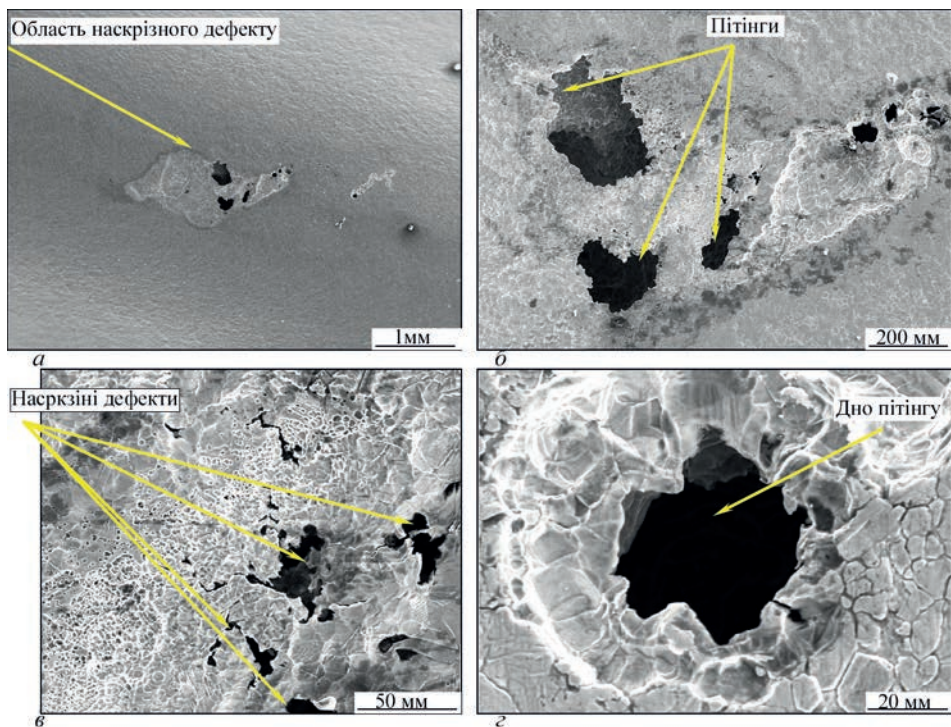


Рис. 5. Вигляд зразка пластини після 1 року експлуатації з наскрізними дефектами: а – вигляд дефекту; б – ненаскрізні пітінги; в – вигляд поверхні навколо пітінгу; г – вигляд пітінгу

Таблиця 4. Вміст легувальних елементів в локальних зонах досліджуваних зразків

Характеристика пластини	Характеристика зразка	Вміст легувальних елементів, %			
		В дефекті		На відстані від дефекту	
		Cr	Ni	Cr	Ni
Після 8 років експлуатації	Без пошкоджень	16,18	10,25	15,66	10,25
Після 1 року експлуатації	Без наскрізних пошкоджень	16,05	9,75	16,79	9,54
	З наскрізними пошкодженнями	15,83	9,88	17,43	9,35

Висновки

Встановлено, що незважаючи на стійкість проти міжкристалітної корозії металу пластин теплообмінника з нержавіючої сталі AISI 316L, перфорація виникла внаслідок руйнування поверхневого пасивного шару сталі та розвитку пітінгової корозії, яке прискорювалося напруженим станом пластин внаслідок холодного деформування і навантаження тиском. Руйнуванню поверхневого шару сприяв тривалий контакт впродовж 4400 год з водним середовищем, наявність залишків водного середовища на поверхні пластин під час простоювання та створення специфічних умов (зниження рН нижче 4, щільний ефект, різниця температур по поверхні пластини тощо), за якого можливий розвиток міжкристалітної корозії. Це призвело до втрати окремими зернами аустеніту зв'язку із матрицею та стало причиною утворення наскрізного дефекту.

Список літератури/References

1. Faes, W., Lecompte, S., Ahmed, Z.Y. et al. (2019) Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers. *Corrosion reviews*, 37(2), 131–155. DOI: <https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0054>

2. Fan, Z.D., Du, J.S., Zhang, Z.B. et al. (2019) Internal leakage of plate heat exchangers caused by cooperation of pitting, crevice corrosion, and fretting. *Engineering Failure Analysis*, 96, 340–347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.10.007>

3. Deen, K.M., Virk, M.A., Haque, C.I. et al. (2010) Failure investigation of heat exchanger plates due to pitting corrosion. *Engineering Failure Analysis*, 17(4), 886–893. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.10.023>

4. Khodamorad, S.H., Alinezhad, N., Fatmehsari, D.H., Ghahtan, K. (2016) Stress corrosion cracking in type. 316 plates of a heat exchanger. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 5, 59–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2016.03.001>

5. Song, M.J., Choi, G., Chae, H. et al. (2021) Corrosion failure analysis of flow plate in plate heat exchanger. *Corrosion Science and Technology*, 20(4), 204–209. DOI: <https://doi.org/10.14773/cst.2021.20.4.204>

6. Song, W.M., Yang, G.R., Hao, Y., Zhang, Y.F. (2013) The corrosion failure analysis of plate pipe for plate heat exchanger. *Advanced materials research*, 750, 2252–2257. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.750-752.2252>

7. Ali, M., Ul-Hamid, A., Khan, T. et al. (2021) Corrosion-related failures in heat exchangers. *Corrosion Reviews*, 39(6), 519–546. DOI: <https://doi.org/10.1515/corrrev-2020-0073>

8. Nariv's'kyi, O.E. (2007) Micromechanism of corrosion fracture of the plates of heat exchangers. *Materials Science*, 43(1), 124–132. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-007-0014-3>

9. Wassilkowska, A., Skowronek, T., Rybicki, S. (2022) Microstructure investigation of premature corroded heat exchanger plates. *Materials Testing*, 58(3), 218–223. DOI: <https://doi.org/10.3139/120.110837>

10. Solomon, N., Solomon, I. (2017) Effect of deformation-induced phase transformation on AISI 316 stainless steel corrosion resistance. *Engineering Failure Analysis*, 79, 865–875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.031>

11. Li, M.J., Tang, S.Z., Wang, F.L. et al. (2017) Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temper-

- ature waste heat utilization: A review on simulation and experiment. *Applied Thermal Engineering*, **126**, 737–761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.095>
12. Jong-Soon, K.I.M., Tae-Ho, K.A.N.G., In-Kwan, K.I.M. (2009) Surface treatment to improve corrosion resistance of Al plate heat exchangers. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **19**, 28–31. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60240-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60240-3)
 13. Davíðsdóttir, S., Gunnarsson, B.G., Kristjánsson, K.B. et al. (2021) Study of corrosion resistance properties of heat exchanger metals in two different geothermal environments. *Geosciences*, **11**(12), 498. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11120498>
 14. Reppich, M. (1999) Use of high performance plate heat exchangers in chemical and process industries. *International j. of thermal sciences*, **38**(11), 999–1008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.095>
 15. Turissini, R.L., Bruno, T.V., Dahlberg, E.P., Setterlund, R.B. (1997) March. Corrosion failures in plate heat exchangers. In: NACE CORROSION (pp. NACE-97522), NACE.
 16. ASTM A 240/A 240M – 04 *Specification for heat-resisting chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels*.
 17. ASTM G48-11(2020)e1 *Standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by use of ferric chloride solution*.
 18. ГОСТ 2999-75 (СТ СЭВ 470-77) *Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. С изменениями № 1, 2*. GOST 2999-75 (ST SEV 470-77) *Metals and alloys. Vickers hardness measurement method. With changes № 1, 2* [in Russian].
 19. 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*.
 20. Shreir, L.L. (2010) *1.05-Basic concepts of corrosion. Shreir's corrosion*. Oxford, Elsevier, pp. 89–100. ISBN 978-0-444-52788-2.
 21. ДСТУ EN ISO 3651-2:2005. *Сталі корозійностійкі. Визначення тривкості до міжкристалічної корозії. Частина 2. Феритні, аустенітні та феритно-аустенітні (двофазні) сталі. Випробування на корозію у сірчано-кислотних середовищах* (EN ISO 3651-2:1998, IDT). DSTU EN ISO 3651-2:2005. *The steel is corroded. Increased toughness to intercrystalline corrosion. Part 2. Ferritic, austenitic and ferritic-austenitic (dual-phase) steels. Testing for corrosion in sulfuric acid media* (EN ISO 3651-2:1998, IDT) [in Ukrainian].
 22. Cleland, J.H. (1996) What does the pitting resistance equivalent really tell us? *Engineering Failure Analysis*, **3**(1), 65–69. DOI: [https://doi.org/10.1016/1350-6307\(95\)00026-7](https://doi.org/10.1016/1350-6307(95)00026-7).

INVESTIGATIONS OF THE CAUSES FOR DAMAGE IN A PLATE HEAT EXCHANGER FROM STAINLESS STEEL AISI 316L IN A FOOD INDUSTRY ENTERPRISE

L.I. Nyrkova, S.O. Osadchuk, L.V. Honcharenko, V.A. Kostin

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: lnyrkova@gmail.com

A complex of studies has been performed to establish the causes for damage of a platelike heat exchanger from AISI 316L stainless steel. Analysis of service conditions, methods of optical, scanning microscopy, visual examination, massometry, physical methods of media analysis, and testing for local corrosion resistance were used to establish the causes for formation of through-thickness damage of heat exchanger plates. It was proved that initiation of through-thickness defects is due to complex interaction of a set of factors, namely: breaking up of passive film in the points of plate abutment, development of intercrystalline corrosion of the surface layer at long downtime of a heat exchanger with a disinfectant preservative liquid, leading to formation of stagnant zones between the corrugations of the plates pressed to one another, where the liquid was retained, and increase of water corrosiveness relative to steel. 22 Ref., 4 Tabl., 5 Fig.

Keywords: stainless steel, heat exchanger, pitting corrosion, local corrosion resistance, corrosion rate

Надійшла до редакції 22.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 11.03.2024

Прийнято 22.03.2024



Національний університет
водного господарства
та природокористування



Wrocław University
of Science and Technology

XVII Міжнародна науково-практична конференція

«ІНТЕГРОВАНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РОБОТОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ»

(ІІРПК-2024)

21 – 22 травня 2024 р., Київ, Україна

Національний авіаційний університет

в режимі ON-LINE

Тематика конференції

Секція 1 Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси

Секція 2 Авіаційна та космічна техніка

Секція 3 Вимірювальна техніка. Метрологія, стандартизація і сертифікація

Секція 4 Енергетика. Електротехнічні системи, світлотехніка

Секція 5 Інформаційні технології в приладобудуванні та машинобудуванні. Нафтогазові технології

Секція 6 Захист інформації та телекомунікаційні системи

Секція 7 Економіка промисловості

Секція 8 Військово-технічні проблеми та освіта

Контакти

Кафедра комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету, корп. 11, ауд. 402.

м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Тел. +38044 406 71 58, +38093 721 10 41, +38098 550 90 08

E-mail: iirpk.nau@gmail.com