

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.4(85).13873

В. Д. МАКАРЕНКО¹, В. І. ДМИТРЕНКО¹, А. М. МАНГУРА¹, Л. А. ТАРАБОРКІН²,
Н. М. СТЕБЕЛЕЦЬКА³

¹Полтавський Національний технічний університет ім. Ю.Кондратюка, Україна

²Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАНУ, Україна

³ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ДЕГРАДАЦІЇ МЕТАЛУ ЕКОЛОГІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ПАРОПРОВОДІВ ВИСОКОГО ТИСКУ

Аналіз вітчизняних і зарубіжних літературних джерел свідчить про відсутність відомостей щодо детального дослідження причин і механізмів окрихчування й руйнування металів, використовуваних в аграрній і харчовій промисловості. Крім того, існуючі науково-технічні та технологічні розробки стосовно забезпечення надійної корозійно-механічної стійкості й довговічності обладнання харчово-переробного виробництва значною мірою містять протиріччя і невизначеність; відсутні кількісно обґрунтовані рекомендації практичного застосування з метою забезпечення корозійно-механічної стійкості обладнання, працюючого в технологічно-агресивних середовищах; отже, є необхідність системного вивчення причин, умов і механізмів корозійних ушкоджень тривало експлуатованих металоконструкцій з метою удосконалення методів і способів підвищення корозійного захисту конструкційних сталей. У роботі досліджено причини корозійних пошкоджень і деградації корозійно-механічних властивостей паропроводів високого тиску, що виникають у процесі довготривалої експлуатації в умовах бурякоцукрового виробництва. Об'єктом досліджень були паропроводи з термінами експлуатації від 0 до 15 років. Показники тріщиностійкості металу та корозійно-водневого розтріскування визначали відповідно до методики НАСЕ. Результати механічних, корозійних і металографічних досліджень дозволили встановити основні причини деградації металу паропроводів довготривалої експлуатації бурякоцукрового підприємства, а саме: наводнювання, окислення й окрихчування металу, – причому інтенсивність цих процесів зростає з підвищенням тиску та температури хімічно активного парового середовища. Показано, що зі збільшенням терміну експлуатації в 1.5-2.5 рази знижуються показники тріщиностійкості K_{Ic} , δ_c і межа корозійно-механічної втомлюваності металу паропроводів. Результати і висновки роботи можуть бути використані при проектуванні й виготовленні технологічного обладнання, зокрема, паропроводів, у харчовому та переробному виробництві.

Ключові слова: паропроводи, тріщиностійкість, корозія, втомна міцність, наводнювання.

Постановка проблеми. На сучасному етапі перед харчовою і переробною галузями України стоїть завдання щодо впровадження у виробництво енергетично, екологічно й економічно ефективних і надійних технологій та нової техніки. Для харчового і переробного виробництва актуальним є підвищення надійності та довговічності технологічного обладнання й інженерних комунікацій, перш за все, паропроводів теплоелектроцентралей [3; 8; 9-11; 13; 14]. Щоб розробити практичні рекомендації щодо вдосконалення технологічного обладнання, необхідно мати чітке уявлення про причини зниження його безпечного робочого ресурсу, які призводять до несанкціонованих відмов і аварійних руйнувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [1; 2; 11], що безпека і надійність паропроводів високого тиску (30...50 ата і $t_{неп}=425...450^\circ\text{C}$) залежать

від якості матеріалу, фізико-механічних властивостей, які в процесі довготривалої експлуатації змінюються, тобто піддаються деградації через корозію. Аналіз даних щодо ремонту теплотехнічного устаткування в харчово-переробній галузі показує, що на ліквідацію наслідків їхньої корозії потрібно близько 89% усіх витрат на ремонт, а витрати, пов'язані безпосередньо з корозією, становлять близько 2% вартості основних виробничих фондів [4].

Сучасні буряко-цукрові виробництва обладнано паровими котлами з тиском 45...50 *ата* і температурою перегрітої пари 450°C та паровими турбінами з тиском 35...40 *ата* і температурою перегріву пари 435°C [8,10]. Цукрові підприємства є крупними користувачами пари для технологічних потреб, витрачаючи її в середньому 60% до ваги перероблених буряків [8], а тому забезпечення експлуатаційної надійності паропроводів, що працюють у екстремальних температурно-баричних умовах, є актуальною інженерно-технічною проблемою.

Утрати працездатності паропроводів буряко-цукрових виробництв унаслідок корозійних пошкоджень і руйнувань призводять до простоїв, значних витрат на ремонт і запасний резерв. Значним чинником ресурсопоглинання є саме корозійні пошкодження й спрацювання теплотехнічного обладнання та транспортних систем, зокрема, паропроводів [1; 2; 4]. Тому підвищення рівня захисту від корозії найбільш важливої транспортної комунікації буряко-цукрового виробництва – паропроводів – є головним напрямком підвищення надійності та довговічності в цілому теплотехнічного устаткування харчово-переробної галузі. Отже, щоб розв'язати цю проблему, необхідно додатково провести комплекс корозійних, механічних і металографічних досліджень на прикладі паропроводів ТЕЦ буряко-цукрового підприємства.

Мета роботи. Дослідження причин корозійних пошкоджень і деградації корозійно-механічних властивостей паропроводів високого тиску в процесі довготривалої експлуатації в умовах буряко-цукрового виробництва.

Методика проведення досліджень. Об'єктами експериментальних досліджень служили паропроводи, виготовлені з котельної сталі марки 25К (границя міцності – 450 МПа) з термінами експлуатації від 0 до 15 років. Дослідні зразки вирізали з паропроводів діаметром 150 мм з товщиною стінки 9 мм у процесі їх ремонту через аварійні (несанкціоновані) відмови або пошкодження. Результати експериментальних досліджень зразків, вирізаних із експлуатованих тривалий час паропроводів, порівнювали з аналогічними характеристиками металу таких самих паропроводів із аварійного запасу.

Першу серію зразків піддавали механічним випробуванням, зокрема, визначали показники тріщиностійкості – параметри критичної інтенсивності напружень (K_{Ic} , МПа·м^{1/2}) та критичного розкриття тріщини (δ_c , мм), що характеризують опір металу крихкому руйнуванню. Випробування з метою визначення параметрів в'язкості руйнування виконували на устаткуванні моделі „INSTRON” (Великобританія) за стандартною методикою [5].

Дослідження другої серії зразків на корозійно-водневе розтріскування проводили за методикою, узгодженою з вимогами Міжнародної асоціації корозіоністів НАСЕ, відповідно до яких база випробувань становить 720 год для $P=0.8 \cdot \sigma^{\min}$ (де σ^{\min} – мінімально допустиме значення межі текучості сталі), pH5-6; для VIP (воднем ініційоване розтріскування) – коефіцієнти довжини тріщини $CLR \leq 6\%$ і товщини тріщини $CTR \leq 3\%$ [7]. Випробували циліндричні зразки, осе-

симетрично розтягнені на установці гирьового типу УСМР-6 під вантажем σ^{\min} (у кожному експерименті випробували по 5-6 зразків).

Комплекс металографічних досліджень пошкодженого металу паропроводів включає, крім стандартних, також рентгеноспектральний аналіз з використанням растрового електронного мікроскопа «JSM-35CF» (фірма «JEOL», Японія). Для рентгено-фазного аналізу використовували стандартну картотеку PDF [7].

Вміст і характер розподілу в металі водню й кисню визначали методом локального мас-спектрального аналізу з лазерним мікрозондом, а також методом плавки проб металу в потоці газу на установці фірми «Лесо».

Результати досліджень. Отримані експериментальні дані свідчать про значне наводнювання, окислення й окрихчування металу паропроводів, що чітко проявляється після 3-5 років експлуатації й призводить зазвичай до корозійних пошкоджень з подальшим руйнуванням труб. Причому на адсорбцію кисню і водню істотно впливає температура пари та тиск, з ростом яких як наводнювання, так і окислення металу збільшується, що призводить до його окрихчування та зниження опору агресивній дії корозійного середовища й зовнішнього тиску. При цьому адсорбція газів (кисню й водню) сильно зростає в області корозійних виразок (каверн). Установлено, що одночасно в процесі довготривалої експлуатації значно знижуються в'язко-пластичні властивості металу (K_{1c}, δ_c), особливо виразно це проявляється за високих температур і тисків водяної пари в паропроводі.

Розрахункові значення показників водневого розтріскування ВІР для сталей, експлуатованих більше 3-х років, становлять: $CLR=3.1-5\%$, а $CTR=1.5-2.6\%$, що відповідає технічним умовам на трубопровідні конструкції, призначені для роботи в умовах високих температур ($500 \dots 600^\circ C$) і тисків ($160 \dots 170 \text{ атм}$) [1,2].

Результати експериментальних корозійно-втомних досліджень, наведені на рис.1, показали, що воднево-кисневе середовище в 1.5-2.5 рази знижує межу втомності довготривало експлуатованих паропроводів порівняно з неексплуатованими.

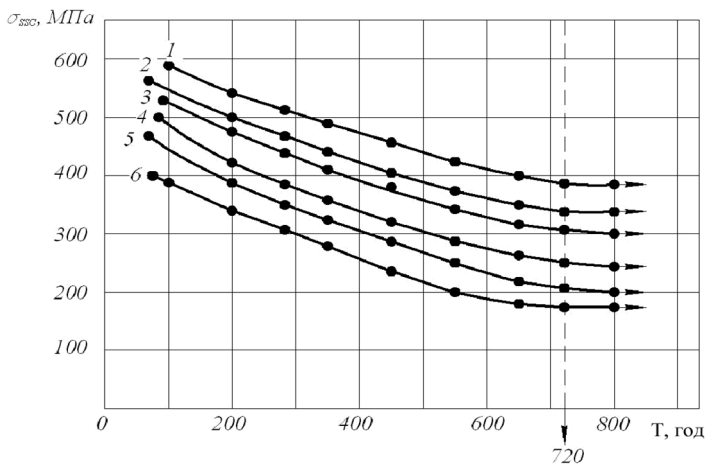


Рис. 1. Графіки змінення корозійної втоми паропроводів, виконаних зі сталі 25К, у разі випробування в корозійному середовищі НАСЕ: терміни експлуатації (у роках): 1 – 0 (неексплуатована сталь); 2 – 3; 3 – 6; 4 – 10; 5 – 15; 6 – 20.

Подані вище дані свідчать про актуальність проблеми корозії металу паротрубопроводів за присутності кисень-водневого середовища і високого тиску па-

ри в транспортній системі, для вивчення особливостей якої необхідно виконати додаткові дослідження.

За допомогою рентгеноструктурних досліджень були отримані дані, які свідчать про розпад цементиту в сталях паропроводів у процесі експлуатації (рис. 2), що безперечно викликає процес знеміцнювання металу паропроводів, знижуючи тим самим опір матеріалу зародженню і росту мікротріщин [5; 7].

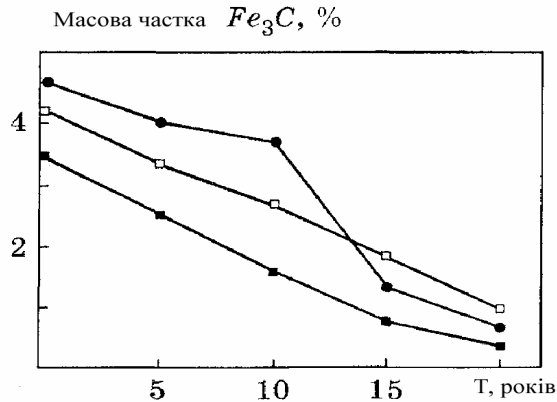


Рис. 2. Змінення кількості цементиту в сталі залежно від терміну експлуатації паропроводів. Позначення: нижня лінія – $P=40 \text{ ama}$; $t=450^\circ\text{C}$; середня лінія – $P=30 \text{ ama}$; $t=415^\circ\text{C}$; верхня лінія – $P=15 \text{ ama}$; $t=350^\circ\text{C}$.

Відомо, що цементит легко розкладається в разі дії на нього атомів водню [7]: $Fe_3C + 2H_2 \leftrightarrow 3Fe + CH_4$. У процесі експлуатації на поверхні металу паропроводів або на поверхні мікропорожнин утворюються активні центри, в яких відбувається дисоціація молекул водню та проникнення атомарного водню в глибину металу, що й призводить до зародження мікротріщин у металі і, як наслідок, викликає в цілому деградацію сталевих паропроводів.

Висновки. Встановлено основні причини деградації металу паропроводів довготривалої експлуатації бурякоцукрового підприємства, які полягають у процесах наводнювання, окислення й окрихчування металу, інтенсивність яких зростає зі збільшенням тиску та температури хімічно активного парового середовища. Показано, що з ростом терміну експлуатації, а також значення тиску і температури пари, у 1.5-2.5 рази знижуються показники тріщиностійкості K_{Ic} , δ_c і межа корозійно-механічної втомності металу паропроводів. Отримані за допомогою металографічних досліджень дані свідчать про розпад цементиту в сталях паропроводів у процесі довготривалої експлуатації в хімічно активному середовищі перегрітої пари під високим тиском, що й призводить до деградації корозійно-механічних властивостей металу паропроводів.

Список літератури

1. Вайнман А.Б., Яцкевич С.В., Мухопад Г.В. и др. О проблеме коррозионных и коррозионно-механических повреждений металла пароводяного тракта блоков СКД //Энергетика и электрификация. – 1995. – №4. – С.1-10.
2. Гулий І.С., Пушанко М.М., Орлов Л.О. та ін. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. – Вінниця: Нова книга, 2001. – 576 с.
3. Макаренко В.Д., Бутко М.П., Мурашко М.І., Кіндрачук М.В. Екологічні аспекти руйнувань агропромислового обладнання. – К.: Видавничий Центр НУБіПУ. – 2013. – 423 с.

4. Макаренко В.Д., Палий Р.В., Галиченко Е.Н. и др. Физико-механические основы сероводородного коррозионного разрушения промысловых трубопроводов. – Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2002. – 412 с.
5. Романив О.Н., Никифорчин Г.Н. Механика коррозионного разрушения конструкционных сплавов. – М.: Металлургия, 1986. – 294 с.
6. Martynova O.I., Vainman A.B. Einige Probleme der Sauerstoff-fahrweise in Anlagen mit Zwangdurchlaufkesseln // VGB Kraftwerkstechnik. – 2011. – №8. – P.659-663.
7. NACE Standard TM-01-77(90). Standard Test Method //NACE. – Houston. P.O.BOX 218340. – 2009. – 22 p.
8. Trucbon M.R., Crolet J.I. Experimental limits of sourer service for tubular steels // SSC Symposium. – Saint-Cloud. – 21. – 2013 p.
9. Specification Tenguz Oil and Gas Plant. Process Plant. Lurgi code № 65102-00-MAL-TENGUIZ II. Specification No.SPC-62900-XP-007.
10. Stardisco J.B., Pitts R.E. Corrosion of Iron in H₂S-CO₂-H₂O System, Mechanism of Sulfide Film Formation and Kinetics of Corrosion // Corrosion. – 2014. –№9. – P.245-253.
11. Макаренко В., Муравьев К., Танзания Е., Каливошко Н. Исследование распределения водорода в сварном соединении в зависимости от температурных условий// Motrol. – 2013. –Vol.15. – №3. – S.105-113.

Стаття надійшла до редакції 16.08.2019.

Макаренко Валерій Дмитрович – докт. техн. наук, професор; професор кафедри нафтогазової інженерії та технологій Полтавського Національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка

Дмитренко Вікторія Іванівна – канд. техн. наук, доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій Полтавського Національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка

Мангура Андрій Миколайович – ст. викладач кафедри нафтогазової інженерії та технологій Полтавського Національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка

Тараборкін Леонід Анатолійович – канд. фіз.-мат. наук, доцент; старший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної Академії наук України; E-mail: leotar@ukr.net

Стебелецька Наталія Миронівна – канд. техн. наук, доцент кафедри загальноінженерної підготовки ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут», вул. Академічна, 20, м. Бережани, Тернопільська обл.

V. D. MAKARENKO, V. I. DMYTRENKO, A. M. MANTURA, L. A. TARABORKIN,
N. M. STEBELETSKA

RESEARCH INTO THE CAUSES OF DEGRADATION OF THE METAL OF HIGH PRESSURE STEAM LINES AT THE BEET-SUGAR ENTERPRISES

The analysis of domestic and foreign literary sources shows that there is no information on a detailed study of the causes and mechanisms of the embrittlement and destruction of metals used in the agrarian and food industries. In addition, existing scientific, technical, and technological developments regarding the provision of reliable corrosion-mechanical stability and durability of food processing equipment are largely contradictory and uncertain; there are no quantitatively justified recommendations for practical application in order to ensure corrosion-mechanical stability of equipment operating in technologically-aggressive environments; therefore, there is a need for a systematic study of the causes, conditions and mechanisms of corrosion damage of the long-running metal structures in order to perfect the methods and ways of improving the corrosion protection of structural steels. We investigated the causes of corrosion damages and degradation of corrosion and mechanical properties of high-pressure steam lines during a long operating under the conditions of beet sugar production. Steam lines having terms of operation from 0 to 15 years were taken as research objects. Here indices of the fracture strength of metal and of corrosion and hydrogen cracking were determined according to NACE procedures. The results of the mechanical, corrosion and metallographic studies have established the main causes of degradation of the metal of prolonged use steam lines in sugar beet production. These causes are the processes of hydrogenation, oxidation and embrittlement of the metal, the intensity of which increases when increasing pressure and temperature of the chemically active medium containing water and steam. It is shown that with the increase in the life of 1.5-2.5 times, the indices of fracture toughness K_{Ic} , δ_c and the limit of corrosion-mechanical fatigue of the metal of steam lines are reduced. Results and conclusions of the work can be used in the design and manufacture of process environment, such as steam lines in the food and processing industry. Results and conclusions of the work can be used in the design and manufacture of process environment, such as steam lines in the food and processing industry.

Key words: steam lines, fracture strength, corrosion, fatigue strength, hydrogenation.

References

1. Vainman A.B., Yatskevitch S.V., Mukhopad G.V. and others. O probleme korrozionnyh i korrozionno-mekhanicheskikh povrezhdeniy metalla parovodyanogo trakta blokov SKD //Energetika i elektrifikatsiya. – 1995. – №4. – С.1-10.
2. Guliy I.S., Pushanko M.M., Orlov L.O. and others. Obladnannya pidpryemstv pererobnoyi i kharchovoyi promyslovosti. – Vinnytsya: Nova knyga, 2001. – 576 c.
3. Makarenko V.D., Butko M.P., Murashko M.I., Kindrachuk M.V. Ekologichni aspekty ruynuvan agropromyslovogo obladdnannya. – K.:Vydavnychiy Tsentr NUBiPU. – 2013. – 423c.
4. Makarenko V.D., Paliy R.V., Galichenko E.N. and others. Fiziko-mekhanicheskie osnovy serovodorodnogo korrozionnogo razrusheniya promyslovyh truboprovodov. – Chelyabisk: Izd-vo TsNTI, 2002. – 412 c.
5. Romaniv O.N., Nikiforchin G.N. Mekhanika korrozionnogo razrusheniya konstruktsionnyh splavov. – M.: Metallurgiya, 1986. – 294 c.
6. Martynova O.I., Vainman A.B. Einige Probleme der Sauerstoff-fahrweise in Anlagen mit Zwangdurchlaufkesseln // VGB Kraftwerkstechnik. – 2011. – №8. – P.659-663.
7. NACE Standard TM-01-77(90). Standard Test Method //NACE. – Houston. P.O.BOX 218340. – 2009. – 22 p.
8. Trucbon M.R., Crolet J.I. Experimental limits of sourer service for tubular steels // SSC Symposium. – Saint-Cloud. – 21. – 2013 p.
9. Specification Tenguz Oil and Gas Plant. Process Plant. Lurgi code № 65102-00-MAL-TENGUIZ II. Specification No.SPC-62900-XP-007.
10. Stardisco J.B., Pitts R.E. Corrosion of Iron in $H_2S-CO_2-H_2O$ System, Mechanism of Sulfide Film Formation and Kinetics of Corrosion // Corrosion. – 2014. – №9. – P.245-253.
11. Makarenko V., Muraviov K., Tanzaniya E., Kalivoshko N. Issledovanie raspredeleniya vodoroda v svarnom soedinenii v zavisimosti ot temperaturnykh usloviy// Motrol. – 2013. – Vol.15. – №3. – S.105-113.