

КОРОЗІЙНА ДЕГРАДАЦІЯ ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ СТАЛЕВИХ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ ТРУБ

В. Д. МАКАРЕНКО¹, О. В. СТОГНІЙ², В. І. ГОЦ³, С. Ю. МАКСИМОВ⁴,
Ю. В. МАКАРЕНКО⁵

¹ Херсонський національний технічний університет;

² Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;

³ Київський національний університет будівництва і архітектури;

⁴ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

⁵ Університет "Манітоба", Вінніпег, Канада

Наведено результати експериментальних досліджень деградації сталевих конструкцій каналізаційних підземних споруд. Зокрема, показано розподіл шкідливих газових елементів (сірки, водню, кисню) по товщині стінки каналізаційних труб уздовж корозійних дефектів у вигляді виразок, а також характер зміни мікротвердості металу залежно від вмісту водню і терміну експлуатації. Для підтвердження зменшення металу з підвищенням концентрації водню виміряно напруження кристалічної ґратки (напруження викривлень).

Ключові слова: корозія, напруження, кристалічність, деформація, мікротвердість, структура.

The results of experimental study of the degradation of steel structures of sewage underground constructions are presented. The distribution of harmful gas elements (sulfur, hydrogen, oxygen) over the wall thickness of sewage pipes along corrosion defects in the form of ulcers, as well as the character of changes in the microhardness of the metal depending on the hydrogen content and service life are shown. To confirm the metal softening with increasing hydrogen concentration, crystal lattice stresses (distortion stresses) were measured.

Keywords: corrosion, stress, crystallinity, deformation, microhardness, structure.

Вступ. У комунальному (каналізаційному) будівництві часто використовують сталевий профільний прокат (труби, таврові та двотаврові балки, кутники) як основний тип конструкцій. В Україні їх частка становить ~90% [1] і оскільки через збільшення терміну експлуатації таких споруд різко зростає зношеність сталевих конструкцій, великого значення набуває дослідження деградації металу в умовах багаторічної експлуатації. Незважаючи на численні дослідження впливу строку експлуатації трубопроводів у корозивно-активних середовищах [2–5], наразі відсутні відомості про праці, де враховують особливості функціонування каналізаційних трубопроводів.

Корозивна агресивність каналізаційних стоків спричинена хлор-йонами, аніонами сірчаних кислот, йонами магнію і кальцію, аніонами хлористих солей і кислот. Зокрема, в каналізаційних системах Києва, Чернігова, Одеси, Харкова в побутово-господарських і промислових стоках присутні (mg·dm³/eq): 1200...2100 Cl⁻; 15...25 SO₄²⁻; 120...300 Mg²⁺+Ca²⁺; 10...25 HCO₃⁻.

Аналіз літературних джерел свідчить, що на сьогодні відсутні відомості щодо наводнювання і окрихчення сталевих трубних конструкцій, особливо каналіза-

ційних споруд, з тривалим терміном експлуатації в агресивних хімічно-активних середовищах, які одночасно містять хімічні інгредієнти та біологічно-агресивні бактерії. Дослідження стосуються головно впливу водню на окрихнення металу трубопроводів за багаторічної експлуатації [6–12]. А тому проблема підвищення корозійно-механічної стійкості трубних конструкцій підземної каналізації є дуже актуальною і важливою для комунального господарства України, а для її ефективного вирішення потрібні додаткові експериментальні дослідження впливу агресивного технологічного середовища на корозійну міцність трубних сталей різних марок і термінів експлуатації.

Нижче досліджено деградацію конструкційних сталей під час тривалої експлуатації безпосередньо на об'єктах каналізаційних споруд.

Методика і матеріали досліджень. Об'єктом досліджень слугували вуглецеві сталі каналізаційних трубопроводів марок 5 і 10, товщина стінки труби – 12 mm. Термін експлуатації каналізаційних конструкцій до 40 years.

Для вивчення ушкодженого металу сталевих конструкцій каналізаційних систем тривалої експлуатації, поряд зі стандартними видами досліджень, використовували також різні варіанти рентгеноспектрального аналізу зі застосуванням растрового електронного мікроскопа JSM-35CF (фірма “Джеол”, Японія); SEM-515 з мікроаналізатором “Link” фірми “Philips”; сканувальну дискретно-точкову Оже-електронну спектроскопію (мікроаналізатор “AE-2000”); вторинну йонну мас-спектроскопію (установка “LAS -2000” з приладом “MS-156”).

Крім того, визначали вміст і характер розподілу в металі водню, кисню і сірки двома методами: локального мас-спектрального аналізу (ЛМСА) з лазерним мікрозондом; плавлення проб металу (стружки) в потоці газу з використанням установки фірми “Лесо”. Мікротвердість визначали відповідно до ГОСТ 9450-80 за допомогою алмазної піраміди і металографічного мікроскопа.

Результати досліджень та їх обговорення. Поєднання корозійного ураження металу з його значним локальним наводнюванням, окисненням і окрихненням встановлено для більшості дослідних випадків пошкоджень, причому це стосується різних сталей. Наведені результати досліджень вмісту газів у металі як з боку поверхні, так і в матриці основного металу (середня частина стінки труби) (табл. 1). Як бачимо, зі збільшенням терміну експлуатації каналізаційних конструкцій (сталь 10), наприклад до 30 years, максимальна концентрація водню зростає порівняно з одним роком експлуатації в 2 рази, а сірки – в 1,5 рази. Аналогічно для сталі 5: відповідно в 2 і 3,4 рази.

Аналогічну тенденцію спостерігаємо щодо вмісту кисню у поверхневих шарах корозійних продуктів, взятих з поверхні трубопроводів з різним терміном експлуатації. Так, для сталі марки 10 максимальна концентрація кисню в продуктах корозії підвищується в 2 рази зі збільшенням терміну експлуатації труб з 10 до 30 years.

Результати вимірювань мікротвердості та вмісту водню за характером їх розподілу по перерізу стінки трубопроводів з різним терміном експлуатації подані на рис. 1. Показано, що під час тривалої експлуатації систем підземної каналізації метал сильно наводнюється, що безпосередньо призводить до його окрихнення (підвищення твердості) (рис. 1b). Аналогічну тенденцію спостерігаємо і для дослідної сталі марки 5 з таким же терміном експлуатації. Як бачимо, мікротвердість експлуатованих сталей зростає порівняно з неексплуатованими з 70×10^7 до $108 \cdot 10^7$ Pa (3 years); $145 \cdot 10^7$ Pa (6 years); $163 \cdot 10^7$ Pa (9 years) і 190×10^7 Pa (12 years), тобто в 1,5; 2,1; 2,3 і 2,7 рази, відповідно.

Таблиця 1. Вміст газів у сталях різних марок залежно від тривалості їх експлуатації

Марка сталі	Термін експлуатації, years	Середнє значення вмісту газів 10 ⁻⁴ , mass%			Екстремальні значення 10 ⁻⁴ , mass%	
		у матриці основного металу	уздовж поверхні (без урахування тріщин)	навколо тріщин і поблизу межі руйнування	максимум (C _{max})	мінімум (C _{min})
Водень						
5	0	2,42	–	–	–	–
	10	3,56	6,27	16,8	53,4	2,22
	20	4,66	7,09	27,8	77,2	3,14
	30	5,78	7,99	42,6	95,3	4,12
10	0	2,11	–	–	–	–
	10	3,22	5,07	14,5	52,1	2,1
	20	4,75	6,07	30,5	65,2	3,42
	30	5,2	6,72	40,3	89,1	4
Кисень						
5	0	22,9	–	–	–	–
	10	30,1	42,2	59,8	102,8	16,1
	20	38,9	56,7	77,6	144,5	22,4
	30	42,1	65,5	87,8	176,6	29,8
10	0	20,7	–	–	–	–
	10	29,8	40,0	54,3	99,8	14,6
	20	34,5	54,6	68,9	144,7	20,1
	30	38,7	60,0	84,1	156,6	23,3
Сірка						
5	0	187,7	–	–	–	–
	10	200,2	312,9	389,8	406,7	187,4
	20	244,3	332,8	402,2	489,7	201,1
	30	264,1	378,5	426,7	532,2	218,8
10	0	165,3	–	–	–	–
	10	178,9	300,8	344,2	387,8	156,7
	20	210,2	311,4	363,3	430,5	180,1
	30	245,5	324,3	399,8	492,3	198,9

Рентгеноспектральним аналізом у зовнішніх шарах продуктів корозії трубних конструкцій з терміном експлуатації 10 років (сталь 5 і 10) встановлена присутність (сталь 10): сірки (до 2,55%); кисню (до 18%), а також кальцію (до 0,76%); кремнію (до 1,68%) і марганцю (до 1,98%). В пластинчастих частинках коричневого кольору під зовнішнім шаром виявлені сірка і марганець (відповідно 2,37 і

4,56 mass%). Аналогічну картину спостерігаємо і для сталі марки 5: вміст сірки в продуктах корозії досягає майже 3 mass% і кисню до 18,6 mass%.

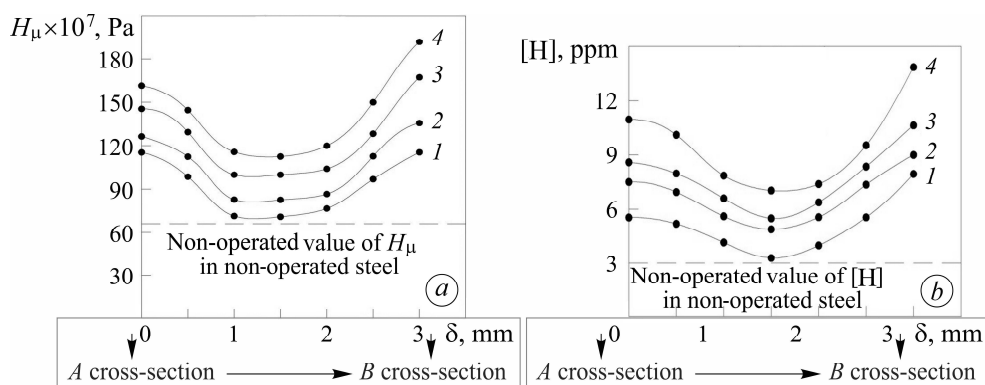


Рис. 1. Характер розподілу мікротвердості (а) і водню (b) по перерізу стінки труби зі сталі 10 каналізаційної споруди: 1 – 3 years; 2 – 6; 3 – 9; 4 – 12 years.

Fig. 1. Character of the distribution of microhardness (a) and hydrogen (b) over the cross-section of the pipe wall of steel 10 of a sewage facility: 1 – 3 years; 2 – 6; 3 – 9; 4 – 12 years.

Використовуючи Оже-електронну спектроскопію (метод дискретно-точкового аналізу), додатково досліджували розподіл елементів у напрямку від зовнішньої поверхні продуктів корозії до металу труби і далі вглибину її стінки.

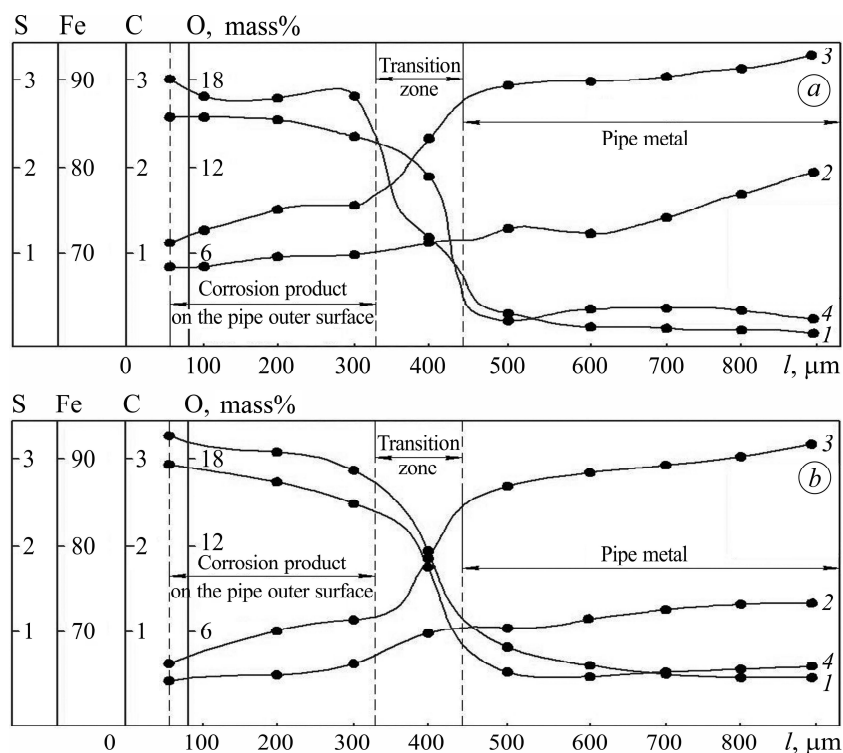


Рис. 2. Глибинні профілі розподілу заліза, вуглецю, сірки і кисню в продуктах корозії і поверхневих шарах металу трубних каналізаційних конструкцій, експлуатованих впродовж 40 years: а – сталь 10; б – сталь 5. 1 – O; 2 – C; 3 – Fe; 4 – S.

Fig. 2. Depth distribution profiles of iron, carbon, sulfur and oxygen in corrosion products and surface metal layers of pipe sewage structures operated for 40 years: a – steel 10; b – steel 5. 1 – O; 2 – C; 3 – Fe; 4 – S.

Глибинний профіль розподілу деяких елементів (Fe, S, O, C) поданий на рис. 2. Інформаційна глибина отриманих профілограм (900 μm) охоплює сумарний шар продуктів корозії – 250 μm ; перехідну зону між цим шаром і зовнішньою поверхнею труби ~ 130 μm , а також близький до неї метал на глибину до 430 μm . Результати підтверджують присутність у продуктах корозії сірки, кисню, марганцю. Додатково виявлено вуглець, який раніше без використання метода Оже не знаходили, оскільки він належить до легких елементів.

За допомогою рентгеноструктурних досліджень отримано результати, які свідчать про розпад цементиту, а також про його перерозподіл у перліті в конструкційних сталях під час тривалої експлуатації (табл. 2), що спричинить знеміцнення металу, яке, своєю чергою, полегшить зародження мікротріщин. Встановлено, що з ростом терміну експлуатації каналізаційних конструкцій суттєво зменшується масова частка цементиту (Fe_3C) в металі. При цьому найсильніше знижується частка цементиту в сталях після 10 years експлуатації каналізаційних споруд.

Вищеназвані процеси, зазвичай, призводять до локального окрихчення металу каналізаційних металоконструкцій, а за сприятливих умов (при знакозмінних циклічних навантаженнях) поблизу цих частинок утворюються мікропори, коагуляція яких спричиняє утворення тріщин.

Рентгеноструктурним аналізом виміряні параметри кристалічної ґратки α -матриці, оцінено її пружні викривлення (табл. 2).

Таблиця 2. Параметри кристалічної ґратки α -Fe, мікронапруження і розподіл вуглецю в сталі трубних конструкцій каналізації

Марка сталі	Термін експлуатації, years	α , Å	σ , МПа	Кількість вуглецю, %	
				у фериті	у цементиті
5	5	2,8665	85	0,018	0,082
	10	2,8669	102	0,022	0,079
	20	2,8677	145	0,030	0,073
	30	2,8689	186	0,036	0,068
	40	2,8692	197	0,039	0,065
10	5	2,8665	94	0,021	0,12
	10	2,8671	126	0,028	0,087
	20	2,8683	163	0,036	0,079
	30	2,8692	210	0,051	0,074
	40	2,8696	243	0,055	0,072

Отже, вищенаведені результати свідчать про інтенсивну деградацію металу під час тривалої експлуатації підземного устаткування та інженерних конструкцій в умовах корозивно-агресивних робочих середовищ каналізаційних систем.

ВИСНОВКИ

З використанням методів рентгеноструктурного аналізу виміряні параметри кристалічної ґратки α -матриці, оцінено її пружні викривлення, а також розподіл вуглецю у фериті і сталі. Як показали отримані результати, збільшення терміну експлуатації сталевих трубних конструкцій каналізації призводить до зростання параметра об'ємно-центрованої кубічної кристалічної ґратки α -твердого розчину і підвищення мікронапружень у структурі, при цьому частина вуглецю після роз-

паду цементиту переходить на межу α -матриці, а решта, мабуть, залишається на дислокаціях, а також йде на формування нових дрібнодисперсних карбідних частинок; відносно великі карбідні частинки утворюються на межах зерен між перлітом і феритом. Показано, що з часом поверхневі шари металу адсорбують значну кількість газів (водню, кисню і сірки). Особливо це сильно проявляється в області корозійного дефекту. Встановлено, що зі збільшенням терміну експлуатації від 1 до 40 years поверхневі шари металу поглинають велику кількість газів, що негативно впливає на корозійно-механічні властивості і на тріщиностійкість металу в цілому.

1. Гончаренко Д., Алейникова А. Водопроводные сети г. Харькова и возможные пути повышения их эксплуатационной долговечности // MOTROL. – 2013. – **15**, № 6. – С. 3–10.
2. Towards a comprehensive review of the deterioration factors and modeling for sewer pipelines: A hybrid of bibliometric, scientometric, and meta-analysis approach / Comfort Salihu, Mohamed Hussein, Saeed Reza Mohandes, and Tarek Zayed // J. of Cleaner Production. – 2022. – **351**. – Article number: 131460. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131460>.
3. A comprehensive failure risk analysis of drainage pipes utilizing fuzzy failure mode and effect analysis and evidential reasoning / Zinan Wang, Yuxuan Yang, Hao Wang, and Xuming Zeng // Buildings. – 2023. – **13**(3). – P. 1–22. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings13030590>.
4. Progress in drainage pipeline condition assessment and deterioration prediction models / Xuming Zeng, Zinan Wang, Hao Wang, Shengyan Zhu, and Shaofeng Chen // Sustainability. – 2023. – **15**(4). – Article number: 3849. <http://dx.doi.org/10.3390/su15043849>.
5. Mingzhu Wang, and Xianfei Yin Construction and maintenance of urban underground infrastructure with digital technologies // Automation in Construction. – 2022. – **141**. – Article number: 104464. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104464>.
6. Sandeep Kumar Dwivedi and Manish Vishwakarma Hydrogen embrittlement in different materials. A review // Int. J. of Hydrogen Energy. – 2018. – **43**, № 46. – P. 21603–21616. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.201>.
7. Hydrogen embrittlement in ferritic steels / May L. Martin, Matthew J. Connolly, Frank W. DelRio, and Andrew J. Slifka // Appl. Phys. Rev. – 2020. – **4**, № 7. – P. 1–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.201>.
8. Сміян О. Д. Водень і руйнування металу об'єктів тривалої експлуатації. – К.: Наук. думка, 2018. – 343 с.
9. Wasim M., Djukic M. B., and Ngo T. D. Influence of hydrogen-enhanced plasticity and decohesion mechanisms of hydrogen embrittlement on the fracture resistance of steel // Eng. Fail. Analysis. – 2021. – **123**. – Article number: 105312. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105312>.
10. Assessment of operational degradation of pipeline steels / H. Nykyforchyn, O. Zvirko, I. Dzio-ba, H. Krechkovska, M. Hredil, O. Tsyrlunyk, O. Student, S. Lipiec, and R. Pala // Materials. – 2021 – **14**. – P. 1–19. DOI: 10.3390/ma14123247.
11. Hydrogen in pipeline steels. Recent advances in characterization and embrittlement mitigation / Hanyu Li, Ranming Niu, Wei Li, Hongzhou Lu, Julie Cairney, and Yi-Sheng Chen // J. of Natural Gas Sci. and Eng. – 2022. – **105**. – Article number: 104709. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104709>.
12. Adarsh Ary, Shashank Gautam, and Shreyash Yadav Impact of hydrogen embrittlement in pipeline structures – A critical review // Tailored Functional Mater. – 2022. – P. 409–428. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-19-2572-6_31.

Одержано 22.05.2023