

УДК 622.691.4:620.17:661.96

СХИЛЬНІСТЬ ДО КРИХКОГО РУЙНУВАННЯ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ЕКСПЛУАТОВАНОГО РОЗПОДІЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ

О. І. ЗВІРКО¹, Є. І. КРИЖАНІВСЬКИЙ², М. І. ГРЕДІЛЬ¹,
Г. М. НИКИФОРЧИН¹, О. Т. ЦИРУЛЬНИК¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу МОН України

Проаналізовано схильність до водневого окрихчення металу різних ділянок експлуатованого впродовж 52 років розподільного газопроводу. Досліджено зразки основного металу та зварного з'єднання, вирізані упоперек твірної труби. Опір крихкому руйнуванню оцінено за кривими холодноламкості та зміною пластичності сталі після електролітичного наводнювання. Встановлено критично низький рівень ударної в'язкості як основного металу, так і зварного з'єднання газопроводу. Виявлено, що попереднє електролітичне наводнювання спричиняє втрату пластичності сталі, що проявляється сильніше для зварного з'єднання та експлуатованого матеріалу.

Ключові слова: *трубна сталь, зварне з'єднання, тривала експлуатація, електролітичне наводнювання, водневе окрихчення.*

The susceptibility of various sections of a gas distribution pipeline, operated for 52 years, to hydrogen embrittlement was analyzed. The specimens of base metal and welded joint, cut out transversally to the pipe generatrix, was tested. The brittle fracture resistance was assessed based on temperature dependences of impact toughness and changes in steel plasticity after its electrolytic hydrogen charging. A critically low impact toughness was determined for both base metal and welded joint in the operated state. It was revealed that preliminary electrolytic hydrogen charging caused the plasticity loss, which was more pronounced for the welded joint and the operated state of the material.

Keywords: *pipe steel, welded joint, long-term operation, electrolytic hydrogen charging, hydrogen embrittlement.*

Вступ. Під час тривалої експлуатації магістральних та розподільних газопроводів фізико-механічні властивості трубних сталей деградує, тобто погіршуються [1–3]. Головною ознакою такої зміни стану металу є його окрихчення, що негативно проявляється у властивостях, пов'язаних зі здатністю пластично деформуватися, зокрема, опиратися корозійно-механічному та воднево-механічному руйнуванню. Останній аспект безпосередньо стосується перспектив транспортування газопровідною мережею водню чи його сумішей із природним газом [4–9], оскільки підвищується ризик порушення цілісності труб за впливу водню. Він полягає у потенційному водневому окрихненні (ВО) сталі трубопроводу як за безпосередньої дії газоподібного водню від його внутрішньої поверхні, так і заздалегідь абсорбованого металом стінки труби [4–9].

Водень транспортують мережею не лише магістральних, але й розподільних трубопроводів, яким притаманні певні особливості. Зокрема, газорозподільні виготовляють з труб невеликих діаметра і товщини, тиски транспортування газу значно нижчі (для середнього тиску до 0,3 МПа, для високого – до 0,6 МПа),

часто більший термін експлуатації порівняно з магістральними та вагома частка надземних ділянок. Добові та сезонні перепади температур у стінці труби зумовлюють конденсацію вологи на її внутрішній поверхні, що посилює інтенсивність корозії. Ці аспекти слід брати до уваги, оцінюючи ризик порушення цілісності труб газорозподільної мережі з урахуванням ВО.

Результати дослідження сталі підземної ділянки тривало експлуатованого розподільного газопроводу засвідчили [8, 9] високу чутливість основного металу (ОМ) до деградації за зниженням ударної в'язкості KCV , а також схильністю до ВО за зміною пластичності внаслідок електролітичного наводнення. Водночас відомо, що зварні з'єднання (ЗЗ) підвищують ризик порушення цілісності трубопроводів [10–15], а вищевказані чинники, що погіршують властивості ОМ газопроводів внаслідок деградації, притаманні і ЗЗ [15]. Опірність ВО визначають мікроструктура та механічні властивості ЗЗ [15–17], однак, вона може знижуватися через тривалу сумісну дію навантажень та водню під час експлуатації [18]. Тому важливо проаналізувати схильність ЗЗ тривало експлуатованого розподільного газопроводу до крихкого руйнування та ВО.

Методика випроб. Досліджували електрозварні труби газорозподільного трубопроводу зі зовнішнім діаметром 159 mm та товщиною стінки 4,5 mm (реальна товщина використаних для досліджень труб могла бути дещо меншою – до 4,2 mm). Вирізняли ОМ труби – низьковуглецеву сталь ВСт3пс феритно-перлітного класу (аналог сталей А570-36 і RSt37-2) та її ЗЗ шириною 15...20 mm. Порівнювали властивості металу у вихідному стані (труба резерву) та після 52 років експлуатації. Вивчали властивості поздовжнього ЗЗ.

Оскільки труби виготовлені з вальцьованої листової сталі, то важливо врахувати напрям вирізання зразків до напрямку вальцювання, тому що текстура сталі спричиняє анізотропію механічних властивостей. Відомо, що опір руйнуванню, визначений на зразках, вирізаних уперек осі труби, нижчий, ніж поздовжніх, вирізаних уздовж її осі, через розшарування між витягнутими волокнами, посилене неметалевими включеннями [1, 19]. Така закономірність проявляється відчутніше для експлуатаційно деградованого металу, а також за умов наводнення. Тому випробовували поперечні зразки, враховуючи результати консервативного оцінювання стану металу за показниками опору крихкому руйнуванню.

Порівнювали основні механічні властивості (границі міцності σ_B та пластичності $\sigma_{0,2}$, відносні видовження δ та звуження ψ) та опір ВО за зниженням пластичності після попереднього електролітичного наводнення (ПЕН), випробовуючи на розтяг плоскі зразки довжиною 60 mm і розмірами робочої частини 1,2×4×22 mm. Малу товщину зразків вибрали, щоб забезпечити наскрізне наводнення їх перерізу. Шов займав 15...20 mm із 22 mm робочої частини зразка. Тому вважали, що на результати механічних випроб в основному впливає ЗЗ. Швидкість деформації становила $3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Опір крихкому руйнуванню визначали за температурними залежностями ударної в'язкості KCV (кривими холодноламкості) [3, 12] у діапазоні $-40...20^\circ\text{C}$ на зразках розмірами 4,5×10×55 mm із V-подібним концентратором у зоні термічного впливу (ЗТВ), яка найчутливіша до крихкого руйнування та дії водню.

Виготовляли поперечні зразки вказаних розмірів із труби порівняно невеликої товщини за процедурою, описаною раніше [8]. Вона полягала у спрямованому вигинанні неробочих ділянок зразків для отримання необхідної геометрії і уникнення деформаційного впливу на їх робочі частини. Концентрацію водню C_H у металі визначали аналізатором ELTRA H-500 при 950°C .

Для порівняння чутливості до водневого окрихчення ОМ і ЗЗ створювали однакові умови ПЕН зразків у розчині сульфатної кислоти H_2SO_4 (рН 3,5). Обраний режим (густина катодного струму 1 mA/cm^2 , тривалість 100 h) дав змогу до-

сягти рівномірної концентрації водню по товщині зразка [8]. Наводнювали тільки робочу та галтельну частини зразків, а решту покривали ізоляційним лаком. Чутливість сталі до ВО оцінювали за зміною характеристик ψ та δ за показником HES (hydrogen embrittlement susceptibility): $HES^{\psi} = [1 - (\psi_H / \psi)] \cdot 100\%$, $HES^{\delta} = [1 - (\delta_H / \delta)] \cdot 100\%$, де ψ_H , ψ – відносне звуження, а δ_H , δ – відносне видовження зразка за випроб у повітрі після ПЕН та без нього, відповідно.

Результати та їх обговорення. Зауважили відмінності у зовнішньому вигляді зварного шва від внутрішньої поверхні труб (рис. 1). Зокрема, для експлуатованої труби спостерігали ознаки сильної корозії, інтенсивнішої в зоні ЗЗ (рис. 1b).

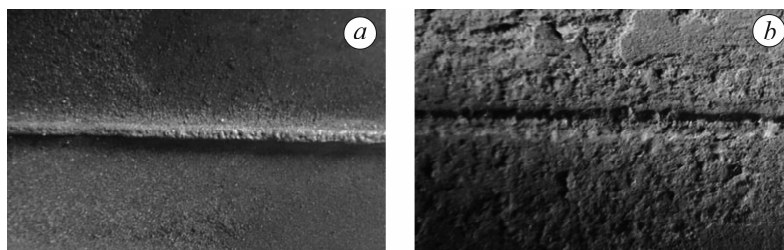


Рис. 1. Зварний шов на внутрішній поверхні неексплуатованої (a) та тривало експлуатованої (b) труби.

Fig. 1. Welded joint on the internal surface of non-operated (a) and long-term operated (b) pipes.

Концентрація водню в ОМ та ЗЗ становила 0,11 та 0,48 ppm у стані поставання та 0,46 і 0,21 ppm після експлуатації. Вона у $\sim 4,2$ раза була вища для ОМ в експлуатованому стані, ніж у вихідному. Водночас нижча концентрація водню C_H у ЗЗ труби в експлуатованому стані порівняно з вихідним, очевидно, зумовлена інтенсивнішою десорбцією дифузійно рухливого водню з експлуатованого ЗЗ під час вилежування.

Механічні властивості сталей за розтягу. ЗЗ вирізняється від ОМ суттєво вищою міцністю (зокрема, границя міцності σ_B металу неексплуатованої труби зменшується від 494 до 470 МПа (табл. 1), подібну закономірність спостерігали і для експлуатованого). Міцність експлуатованого ОМ суттєво нижча, ніж труби запасу, а для ЗЗ її зниження несуттєве (значення $\sigma_{0,2}$ зменшилося від 372 до 369 МПа, а σ_B – від 494 до 474 МПа). Якщо вважати, що зменшення міцності сталей спричинила деградація металу, то можна дійти висновку, що литий метал, якому не властива текстура, на відміну від вальцьованого, практично нечутливий до експлуатаційних змін. Це вказує на важливу роль текстури сталі, сформованої вальцюванням, у деградації металу за показниками міцності.

Експлуатований матеріал істотно поступався неексплуатованому за характеристиками пластичності (табл. 1). Втрата міцності сталі у поєднанні із нижчою пластичністю є ознакою експлуатаційної деградації за механізмом розвитку мікропошкоджень [1, 20, 21], що чіткіше проявилось для ОМ.

Ударну в'язкість як міру опору крихкому руйнуванню сталей вважають одним із найважливіших показників їх експлуатаційної деградації [1–3] (табл. 1). ОМ у вихідному стані властива типова крива холодноламкості (крива 1 на рис. 2), однак, температура крихко-в'язкого переходу приблизно -5°C і доволі висока для цього класу сталей. Для експлуатованої сталі (крива 2) не виявили чіткого крихко-в'язкого переходу, а її ударна в'язкість критично низька, і лише за додатних температур опір крихкому руйнуванню дещо підвищується. Для порівняння, експлуатованим сталям магістральних газопроводів властиві вищі значення удар-

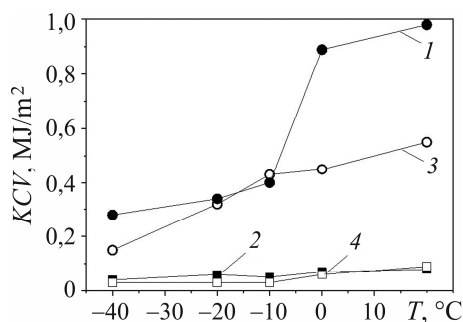
ної в'язкості – в межах 0,35...0,45 MJ/m² [1–3]. Ударна в'язкість ЗТВ у вихідному стані за температури вище 0°C майже удвічі нижча, ніж вихідного ОМ (0,55 проти 0,98 MJ/m²), а для експлуатованих матеріалів практично однакова: критично низька (0,03...0,09 MJ/m²) і майже не залежить від температури, що свідчить про суттєве окрихнення обох досліджуваних ділянок газопроводу внаслідок тривалої експлуатації.

Таблиця 1. Механічні властивості сталі різних ділянок трубопроводу до та після тривалої експлуатації

Ділянка трубопроводу	Стан сталі	$\sigma_{0,2}$	σ_B	ψ	δ	KCV
		МПа		%		MJ/m ²
ОМ	Вихідний	335	470	58	17	0,98
	Експлуатований	300	410	53	16	0,08
ЗЗ	Вихідний	372	494	50	9	0,55
	Експлуатований	369	474	44,1	8,2	0,09

Рис. 2. Криві холодноламкості ОМ (1, 2) та ЗТВ (3, 4) труби газопроводу у вихідному стані (1, 3) та після експлуатації (2, 4).

Fig. 2. Ductile-to-brittle transition temperature curves for base metal (BM) (1, 2) and heat affected zone (3, 4) of a gas pipeline in the as-received state (1, 3) and after operation (2, 4).



Чутливість сталей до ВО. Електролітичне наводнювання практично не вплинуло на міцність ОМ у вихідному стані, однак, експлуатований виявився чутливим до ВО (рис. 3).

На відміну від ОМ, пластичність ЗЗ істотно знизилася внаслідок ПЕН вже у вихідному стані (рис. 3с, d), а в експлуатованому – ще відчутніше. При цьому відносно звуження чутливіше для оцінювання водневої крихкості металу, ніж відносно видовження, що узгоджується з відомими результатами [1, 9].

Схильність сталі досліджуваних ділянок газопроводу до ВО за втратою пластичності кількісно оцінювали за показниками HES (табл. 2). ОМ нечутливий до водню у вихідному стані, що типово для низькоміцних трубних сталей, однак, стає схильним внаслідок експлуатації, що пояснюють розвитком пошкодженої, спричиненої високим тиском водню в мікроефектах [20, 21]. Метал ЗЗ у різних станах чутливий до впливу водню [10, 15–17], що посилюється внаслідок експлуатації [18].

Таблиця 2. Схильність трубної сталі до ВО за показниками HES

Ділянка трубопроводу	Стан сталі	HES ^δ	HES ^ψ
		%	
ОМ	Вихідний	0	2
	Експлуатований	25	34
ЗЗ	Вихідний	23	27
	Експлуатований	41	41

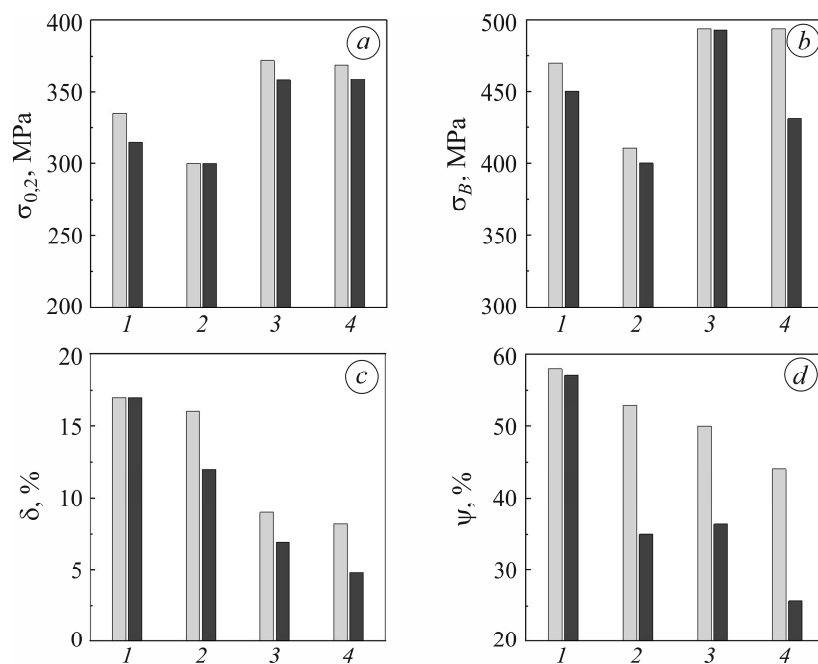


Рис. 3. Міцність $\sigma_{0.2}$ і σ_B (a, b) та пластичність δ і ψ (c, d) зразків ОМ (1, 2) та ЗЗ (3, 4) у вихідному (1, 3) та експлуатованому (2, 4) станах без (світлі стовпчики) та після ПЕН (темні).

Fig. 3. Strength $\sigma_{0.2}$ and σ_B (a, b) and plasticity δ and ψ (c, d) of specimens of BM (1, 2) and welded joints (3, 4) in the as-received (1, 3) and operated (2, 4) states without (light bars) and after preliminary electrolytic hydrogen charging (dark ones).

ВИСНОВКИ

Експлуатована упродовж 52 років сталь ВСтЗпс газорозподільного газопроводу має нижчі міцність, пластичність та ударну в'язкість порівняно з вихідним станом, що вважали ознакою її експлуатаційної деградації. За результатами аналізу впливу ПЕН на метал виявлено чутливість ОМ експлуатованої труби до ВО і її посилення для ЗЗ внаслідок експлуатації. Загалом ЗЗ схильніше до водневої крихкості, ніж ОМ, як у вихідному, так і в експлуатованому станах. При цьому відносно звуження чутливіше до впливу водню, ніж відносно видовження. Критично низький опір крихкому руйнуванню за ударною в'язкістю для експлуатованих ОМ та ЗЗ, особливо в діапазоні від'ємних температур, свідчить про ризик втрати цілісності трубопроводу.

Дослідження виконано за часткової фінансової підтримки НАН України (НДР № 0124U000911) та ТОВ "Нафтогазбудінформатика".

1. *The influence of the structural-mechanical state of the gas transit pipeline steel on the susceptibility to hydrogen embrittlement* / O. I. Zvirko, O. T. Tsyrlunyk, H. V. Krechkovska, M. I. Hredil, H. M. Nykyforchyn, O. I. Venhryniuk, and I. O. Tsybailo // *Materials Science*. – 2024. – **60**, № 1. – P. 20–26. DOI: 10.1007/s11003-024-00845-z
2. *Low temperature impact toughness of the main gas pipeline steel after long-term degradation* / P. O. Maruschak, I. M. Danyliuk, R. T. Bishchak, and T. Vuherer // *Cent. Eur. J. Eng.* – 2014. – **4**. – P. 408–415. DOI: 10.2478/s13531-013-0178-6
3. *Influence of long-term operation of the 17H1S steel on the main gas pipeline on the change of the mechanical properties* / H. Krechkovska, V. Kulyk, V. Vira, and O. Student // *Procedia Struct. Integr.* – 2022. – **36**. – P. 334–341. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.043
4. *Kappes M. A. and Perez T. E. Blending hydrogen in existing natural gas pipelines: Integrity consequences from a fitness for service perspective* // *J. Pipeline Sci. Eng.* – 2023. – **3**, № 4. – Article number 100141. DOI: 10.1016/j.jpse.2023.100141

5. *Pluvinage G., Toth L., and Capelle J.* Effects of hydrogen addition on design, maintenance and surveillance of gas networks // *Processes*. – 2021. – **9**, № 7. – Article number 1219. – DOI: 10.3390/pr9071219
6. *Use of existing gas infrastructure in European hydrogen economy / S. Lipiäinen, K. Lipiäinen, A. Ahola, and E. Vakkilainen* // *Int. J. Hydrog. Energy*. – 2023. – **48**, № 80. – P. 31317–31329. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.283
7. *Cao J.* Effect of hydrogen embrittlement on the safety assessment of low-strength hydrogen transmission pipeline // *Eng. Fail. Anal.* – 2024. – **156**. – Article number 107787. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107787
8. *Methodology of hydrogen embrittlement study of long-term operated natural gas distribution pipeline steels caused by hydrogen transport / H. Nykyforchyn, L. Unigovskiy, O. Zvirko, M. Hredil, H. Krechkovska, O. Tsyrlunyk, and O. Student* // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2022. – **16**, № 59. – P. 396–404. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.59.26
9. *Susceptibility of carbon pipeline steels operated in natural gas distribution network to hydrogen-induced cracking / H. Nykyforchyn, L. Unigovskiy, O. Zvirko, M. Hredil, H. Krechkovska, O. Student, and O. Tsyrlunyk* // *Procedia Struct. Integr.* – 2022. – **36**. – P. 306–312. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.01.039
10. *A study on hydrogen embrittlement of a high-strength pipeline steel weldment after micro-structure manipulation by targeted heat treatments / P. Zhang, M. Laleh, A. E. Hughes, R. K. W. Marceau, T. Hilditch, and M. Y. Tan* // *Int. J. Hydrog. Energy*. – 2025. – **97**. – P. 1199–1211. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.012
11. *Golovko V. V., Kostin V. A., and Zhukov V. V.* Influence of nanomodification on the micro-structure of the metal of welded joints of low-alloy steels // *Materials Science*. – 2024. – **59**, № 6. – P. 762–769. DOI: 10.1007/s11003-024-00838-y
12. *Evaluation of the ductile-to-brittle transition temperature in steel low carbon / C. M. Moura, J. J. Vilela, E. G. Rabello, G. de Paula Martins, and J. R. Gonçalves Carneiro* // *Proc. of Int. Nuclear Atlantic Conf. (INAC 2009)*. – Associação Brasileira De Energia Nuclear, 2009. – P. 1–12.
13. *Koščo T. and Chmelko V.* Investigation of full field of material properties of X52 welded joint // *Procedia Struct. Integr.* – 2024. – **54**. – P. 514–520. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.01.114
14. *The structural integrity of high-strength welded pipeline steels: A review / M. P. Singh, D. K. Shukla, R. Kumar, and K. S. Arora* // *Int. J. Struct. Integr.* – 2021. – **12**, № 3. – P. 470–496. DOI: 10.1108/IJSI-05-2020-0051
15. *Sun Y. and Cheng Y. F.* Hydrogen-induced degradation of high-strength steel pipeline welds: A critical review // *Eng. Fail. Anal.* – 2022. – **133**. – Article number 105985. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105985
16. *Assessing the hydrogen embrittlement susceptibility of an existing L360NB natural gas pipeline steel for 100% hydrogen transport / A. Hamed, C. Posch-Peperkorn, J. Maierhofer, M. Beschliesser, S. Fink, and G. Mori* // *Corr. Sci.* – 2025. – **244**. – Article number 112648. DOI: 10.1016/j.corsci.2024.112648
17. *Hydrogen-assisted fracture resistance of pipeline welds in gaseous hydrogen / J. A. Ronevich, E. J. Song, B. P. Somerday, and C. W. San Marchi* // *Int. J. Hydrog. Energy*. – 2021. – **46**, № 10. – P. 7601–7614. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.239
18. *Susceptibility of a welded joint of 17G1S steel in a gas main to hydrogen embrittlement / O. T. Tsyrlunyk, E. I. Kryzhanivskiy, D. Y. Petryna, O. S. Taraevskiy, and M. I. Hredil* // *Materials Science*. – 2004. – **40**. – P. 844–849. DOI: 10.1007/s11003-005-0123-9
19. *Charpy impact toughness and transition temperature for API 5L X52 seamless pipeline / S. Capula-Colindres, G. Terán, J.C. Velázquez, D. Angeles-Herrera, and E. Torres-Santillán* // *Strength Mat.* – 2024. – **56**, № 1. – P. 136–143. DOI: 10.1007/s11223-024-00635-7
20. *Mechanism of development of damage of low-strength pipe steel due to hydrogenation under operation / O. Zvirko, M. Hredil, O. Tsyrlunyk, O. Student, and H. Nykyforchyn* // *Materials Science*. – 2023. – **59**, № 3. – P. 306–312. DOI: 10.1007/s11003-024-00778-7
21. *Damage associated with interactions between microstructural characteristics and hydrogen/methane gas mixtures of pipeline steels / T. T. Nguyen, K.-O. Bae, P. Jaeyeong, S. H. Nahm, and U. B. Baek* // *Int. J. Hydrogen Energy*. – 2022. – **47**, № 73. – P. 31499–31520. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.060

Одержано 02.12.2024