

УДК 622.691.4:620.1:661.96

ВПЛИВ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНОГО СТАНУ СТАЛІ ТРАНЗИТНОГО ГАЗОПРОВОДУ НА СХИЛЬНІСТЬ ДО ВОДНЕВОГО ОКРИХЧЕННЯ

О. І. ЗВІРКО, О. Т. ЦИРУЛЬНИК, Г. В. КРЕЧКОВСЬКА, М. І. ГРЕДІЛЬ,
Г. М. НИКИФОРЧИН, О. І. ВЕНГРИНЮК, І. О. ЦИБАЙЛО

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

Обґрунтовано різні режими катодної поляризації зразків трубної сталі за густиною струму, які зумовлюють її помірне та інтенсивне наводнювання. Визначено опір водневій крихкості сталі 17Г1С у вихідному та експлуатованому станах за зміною її пластичності залежно від інтенсивності наводнювання та орієнтації зразків до осі труби. Неексплуатована сталь не схильна до водневого окрихчення за помірного наводнювання, тоді як експлуатована її проявила. Металографічним та фрактографічним аналізами встановлено важливу роль неметалевих включень у водневому окрихченні сталі, яке залежало від її структурно-механічного стану та умов наводнювання. За помірного окрихчення проявилось міжзеренними, тоді як за інтенсивного – кризьзеренними фрагментами руйнування. Ці відмінності пов'язано з різними шляхами транспортування абсорбованого металом водню.

Ключові слова: *трубна сталь, мікроструктура, тривала експлуатація, режими наводнювання, механізм водневого окрихчення.*

Different modes of cathodic polarization of pipe steel specimens based on current density, which determine its moderate and intense hydrogen charging, are substantiated. The hydrogen embrittlement resistance of 17Г1С steel in the as-delivered and post-operated states was determined by the change in plasticity depending on the hydrogen charging intensity and the direction of cutting the samples relative to the pipe axis. Unexploited steel is not prone to hydrogen embrittlement under moderate hydrogen charging, while exploited steel has shown this feature. Using metallographic and fractographic analyses, the important role of non-metallic inclusions in the hydrogen embrittlement of steel, which depended on its structural-mechanical and hydrogen charging conditions, was determined. Under moderate hydrogen charging the intergranular embrittlement takes place while under intense transgranular embrittlement; the differences are due, obviously, to different mechanisms of transport of hydrogen absorbed by the metal.

Keywords: *pipeline steel, microstructure, long-term operation, hydrogen charging regimes, hydrogen embrittlement mechanism.*

Вступ. Останнім часом особливу увагу зосереджують на розвитку водневої енергетики, використовуючи відновлювальні джерела енергії. Тут важливе місце займає транспортування водню трубопроводами [1–8], в тому числі з терміном експлуатації понад 30 років. Результати оцінювання їх технічного стану свідчать про відчутне погіршення вихідних фізико-механічних властивостей сталей: зниження опору крихкому руйнуванню та зростання їх схильності до водневого окрихчення [9–11], через що можливе порушення цілісності труб газопроводів. Транспортування ними водню може посилювати цей ризик [12–22]. Щоб обґрунтувати можливість безпечного застосування наявної мережі газопроводів для транспортування водню чи його суміші з природним газом, необхідно проаналі-

Контактна особа: О. І. ЗВІРКО, e-mail: olha.zvirko@gmail.com

зувати вплив водню на тривало експлуатований метал з урахуванням матеріалознавчих аспектів його схильності до окрихчення. Нижче оцінено схильність низьколегованої сталі магістрального газопроводу до водневого окрихчення з урахуванням її структурно-механічного стану та інтенсивності наводнювання.

Методика випроб. Досліджували низьколеговану сталь 17Г1С (аналог сталі API 5L X52) у двох станах: вихідному (труба резерву) та експлуатованому (впродовж 38 років на магістральному газопроводі). Зразки для випроб вирізували з труб діаметром 1220 mm з товщиною стінки 12 mm у поздовжньому та поперечному до їх осі напрямках. Визначали границі міцності σ_B та пластичності $\sigma_{0,2}$, відносні видовження δ та звуження ψ , а також ударну в'язкість KCV на зразках Шарпі.

Для оцінки схильності сталі до водневого окрихчення застосовували попереднє електролітичне наводнювання (ПЕН) зразків у розчині сульфатної кислоти H_2SO_4 (pH 1) з додаванням 10 g/l тіосечовини $(NH_2)_2CS$ як стимулятора. Щоб досягти рівномірного наводнювання поперечного перерізу зразка, наводнювали впродовж 120 h за густини струму $i = 0,05$ і 1 mA/cm^2 , що відповідала помірній та високій інтенсивності процесу, відповідно. В останньому випадку намагалися також уникнути появи водневих пухирів на поверхні зразків. Вважали, що в розчині H_2SO_4 вони формуються за $i > 10 \text{ mA/cm}^2$ [23]. Циліндричні зразки $\varnothing 5 \text{ mm}$ та п'ятикратною довжиною робочої частини розтягували у повітрі через $\sim 30 \text{ min}$ після завершення ПЕН за швидкості деформування $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, яка є типовою для визначення базових механічних властивостей. Схильність сталей до водневого окрихчення оцінювали за показником HES (hydrogen embrittlement susceptibility): $HES = [1 - (\psi_H / \psi)] \cdot 100\%$, де ψ_H , ψ – відносне звуження зразка за випроб розтягом у повітрі після ПЕН та без нього, відповідно.

Металографічно та фрактографічно аналізували структурні зміни та механізми руйнування внаслідок ПЕН. Структурні особливості сталі оцінювали на поперечному та поздовжньому відносно осі труби шліфах з допомогою оптичного мікроскопа BH200M-T. Для їх виготовлення використали пристрій LaboPol-2. Злами після механічних випроб зразків вивчали, застосовуючи сканівний електронний мікроскоп EVO 40XVP.

Результати та їх обговорення. Мікроструктура сталі. Обом варіантам сталі 17Г1С (у вихідному стані і після експлуатації) властива текстура з чергуванням смуг з феритних і перлітних зерен (рис. 1). Ширина смуг феритних у неексплуатованій сталі 10...25 μm , а в експлуатованій – 20...40 μm (на окремих ділянках досягала навіть 60 μm).

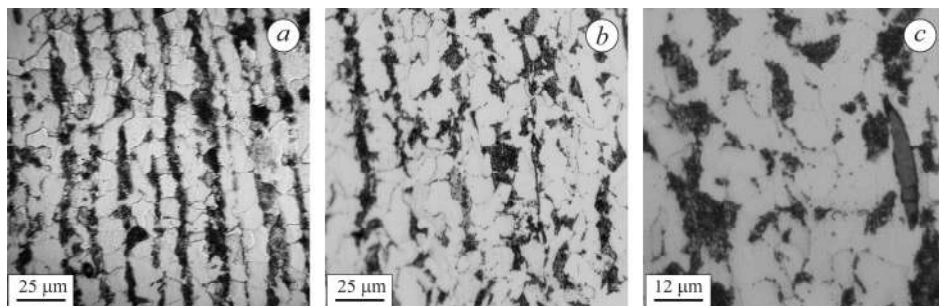


Рис. 1. Мікроструктура сталі труб з резерву (a) та після 38 років експлуатації (b, c).

Fig. 1. Microstructure of steel of reserve pipes (a) and after 38 years of operation (b, c).

Ширина прошарків зерен перліту, що розмежовували смуги фериту, у вихідному стані становила 15 μm , а в експлуатованому дорівнювала 10 μm . Крім того, зафіксували значну кількість неметалевих включень, орієнтованих уздовж напря-

му вальцювання. В експлуатованій сталі лише її частина зберегла хоча б неповну когезію з матрицею. Крім того, виявили незначне розтріскування самих включень (рис. 1b, c).

Вплив умов експлуатації на механічні властивості сталі. Загалом характеристики міцності сталі труби резерву та тривало експлуатованої (див. таблицю) не відрізнялись. Встановили лише дещо вищі значення границі плинності на поперечних зразках. Водночас, з одного боку, отримали нижчі характеристики пластичності для експлуатованої сталі, а з іншого – для поперечних зразків. Закономірність впливу орієнтації зразків на їх пластичність така ж, як текстури вальцьованих сталей [24, 25]. Меншу пластичність експлуатованого металу проти вихідного можна пояснити як його деградацією на газопроводі, так і можливими відмінностями мікроструктури ще перед експлуатацією. Однак, враховуючи сталість характеристик міцності, такі зміни вважали наслідком його експлуатаційної деградації.

Механічні характеристики сталі 17Г1С

Стан	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCV
	МПа		%		J/cm ²
Вихідний	568 / 589	393 / 441	28,1 / 25,8	71 / 68	129 / 71
Експлуатований	570 / 566	390 / 422	25 / 24	66 / 65	103 / 65

Примітка: в чисельнику – результати випроб поздовжніх, у знаменнику – поперечних зразків.

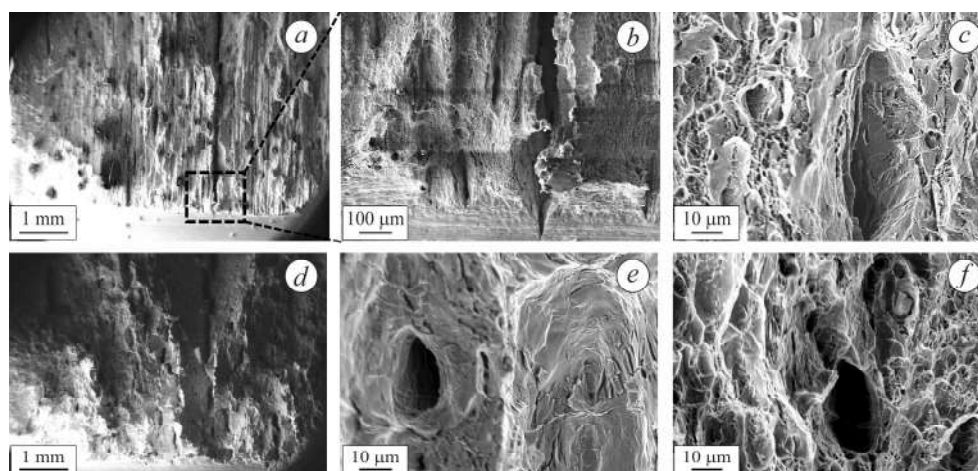


Рис. 2. Мікрофрактограми поперечних (a–c) та поздовжніх (d–f) зразків експлуатованої сталі після випроб на удар.

Fig. 2. Microfractograms of transverse (a–c) and longitudinal (d–f) specimens of the operated steel after impact tests.

Ударна в'язкість як характеристика опору крихкому руйнуванню чутливіша до змін стану сталі (див. таблицю), що суттєво знижується внаслідок її експлуатації, і особливо відчутно – на поперечних зразках. Макрофрактографічним аналізом встановили (рис. 2), що текстурованість зламів розшаруваннями очевидніша на поперечних зразках, ніж на поздовжніх. Це особливо помітно в експлуатованій сталі, де щільність дрібних розшарувань більша на поперечних зразках (рис. 2a, b). Зауважили істотно менше розкриття берегів розшарувань на зламі

поперечного зразка порівняно з поздовжнім (рис. 2d), що підтверджує окрихчення матеріалу. Крім того, деякі розшарування виходили на поверхню механічного надрізу (рис. 2b), що може свідчити про їх присутність у металі ще перед випробами на ударну в'язкість внаслідок експлуатаційної деградації.

Різна орієнтація поверхні поширення руйнування до текстури сталі зумовила і відмінності в орієнтації поверхонь розшарувань на стрічках неметалевих включень (рис. 2c, e). На поздовжньому зразку вони виглядали як округлі розшарування, розташовані в площині зламу (рис. 2e, f). Як правило, їх окантовував гребінь з паралельних слідів витягування на переході до ямкового рельєфу, що може вказувати на появу таких розшарувань ще перед випробами на ударну в'язкість, під час яких і відбувалось затуплення вершин цих дрібних внутрішніх дефектів. На зламі поперечного зразка розшарування (рис. 2c) поширювались перпендикулярно до поверхні зламу і були значно довшими, що узгоджується із його меншою ударною в'язкістю (див. таблицю).

Схильність сталей до водневого окрихчення. За помірного наводнювання чутливості сталі труби резерву до окрихчення (рис. 3a, b) за розтягу у повітрі і поздовжніх, і поперечних зразків не виявили. Проте після високоінтенсивного ПЕН її пластичність дещо знизилася (особливо на поперечних зразках). Тобто абсорбований сталлю водень підвищив її чутливість до неоднорідності структури. Сталі експлуатованої труби притаманна низька пластичність навіть за помірного ПЕН (рис. 3c, d). Її структура суттєво впливала на пластичність за розтягу зразків обох варіантів орієнтації. І ефект окрихчення посилювався зі зростанням інтенсивності наводнювання.

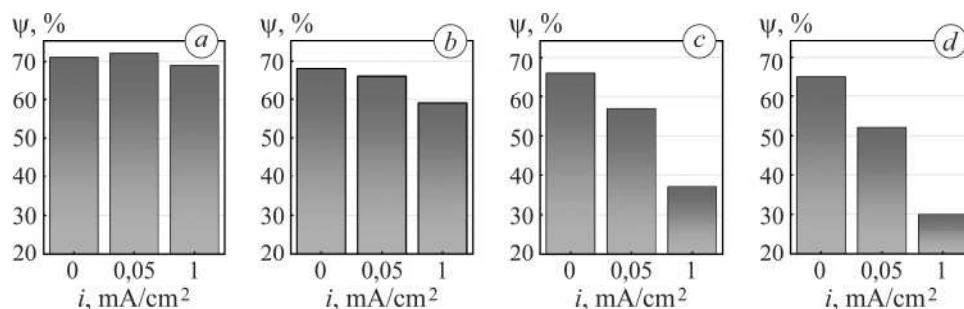


Рис. 3. Вплив структурно-механічного стану сталі 17Г1С труби резерву (a, b) та після експлуатації (c, d) на її відносне звуження ψ залежно від густини струму i під час ПЕН та орієнтації зразків: a, c – поздовжня; b, d – поперечна.

Fig. 3. Influence of the structural and mechanical state of 17Г1С steel of the reserve (a, b) and the operated (c, d) pipes on its reduction in area ψ depending on current density i under preliminary electrochemical hydrogen-charging (PEH) and specimen orientation: a, c – longitudinal; b, d – transverse.

За показником *HES* проаналізували вплив текстури сталі на її опір воднево-му окрихченню (рис. 4). Низькі його значення для неексплуатованої підтвердили її імунітет до водневого окрихчення навіть за інтенсивного наводнювання ($HES = 13\%$ для $i = 1$ mA/cm²). Водночас для експлуатованої досяг 54%. Тут зауважили ще одну особливість: значення *HES* істотно зросло зі зміною орієнтації зразків від поздовжньої до поперечної (рис. 4a). Це свідчить про вирішальну роль текстури сталі за умов, сприятливих для водневого окрихчення [26, 27]. Однак вона не проявилася за аналізу впливу інтенсивності наводнювання на показник *HES* (рис. 4b), на що вказує практична паралельність ліній 3 і 4, що відповідають експлуатованій сталі.

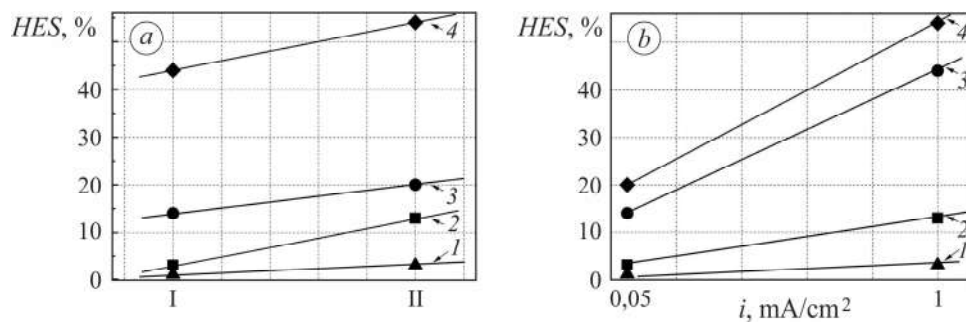


Рис. 4. Схильність до водневого окрихнення за показником HES сталі 17Г1С у вихідному (1, 2) та експлуатованому (3, 4) станах залежно від орієнтації зразків (а: I – поздовжні; II – поперечні, отримані за густини струму під час ПЕН 0,05 (1, 3) та 1 mA/cm^2 (2, 4)) та густини струму i під час ПЕН (b: 1, 3 – поздовжні; 2, 4 – поперечні).

Fig. 4. Susceptibility of 17Г1С steel to hydrogen embrittlement HES index in the initial (1, 2) and operated (3, 4) states depending on the direction of specimens cutting (a: I – longitudinal; II – transverse, obtained at current density during PEN 0.05 (1, 3) and 1 mA/cm^2 (2, 4)) and current density i during PEN (b: 1, 3 – longitudinal; 2, 4 – transverse specimens).

Фрактографічно вивчали відмінності ознак водневого окрихнення експлуатованої сталі за різної інтенсивності наводнювання. Крім того, врахувавши типovu для такого класу сталей макрогеометрію зламів типу чашка-конус, окремо досліджували особливості впливу ПЕН у межах центральної та конусної їх ділянок. На макроскопічному рівні виявили, що на противагу типовому в'язкому зламу без наводнювання (рис. 5a) після помірного ПЕН формувалася овальний злам, нахилений до осі зразка (рис. 5b), що вважали ознакою домінування зсуву під час його утворення. Водночас злам після високоінтенсивного ПЕН практично нормально орієнтований, і лише біля бічної поверхні зразка спостерігали вузькі, значно пологіші, ніж без наводнювання, конусні його частини (рис. 5c).

В експлуатованій сталі визначальним елементом зламу залишалися розшарування на неметалевих включеннях, стрічки яких орієнтовані в напрямі текстури в стінці труби і чітко виділяються на фоні в'язкого ямкового рельєфу (рис. 5d). Таких розшарувань було значно менше на зламі експлуатованої сталі після помірного ПЕН (рис. 5e). Це можна пояснити і полегшенням абсорбованим воднем пластичної деформації (фізичне трактування), і створенням внаслідок наводнювання внутрішніх локальних напружень у металі (механічне трактування), що визначають траєкторію руйнування згідно з домінантним шляхом транспортування водню. Однак за високоінтенсивного ПЕН у центрі перерізу зразка виявляли ділянки, що межували з глибокими дефектами на зламі, які трактували як відколи (рис. 5f). В цьому випадку починав домінувати чинник водневого окрихнення.

Під час аналізу ділянок зламів в околі бічної поверхні зразків зафіксували принципи відмінності, пов'язані з різними режимами ПЕН. Якщо в сталі, наводненій за помірного ПЕН, в околі розшарувань, орієнтованих уздовж текстури, формувались вузькі ділянки міжзеренного руйнування (рис. 5g), то після високоінтенсивного виникали винятково кризьзеренні відколи (рис. 5h). Отже, за помірного наводнювання визначальною була дифузія водню вздовж меж зерен [28–30], тоді як за високого – їх тілом [31]. Осередками зародження відколів в експлуатованій сталі, наводненій за високої інтенсивності, однозначно стали розшарування (рис. 5i). Відколи поширювалися в фериті, тоді як у межах перлітних зерен зберігалися елементи в'язкого руйнування.

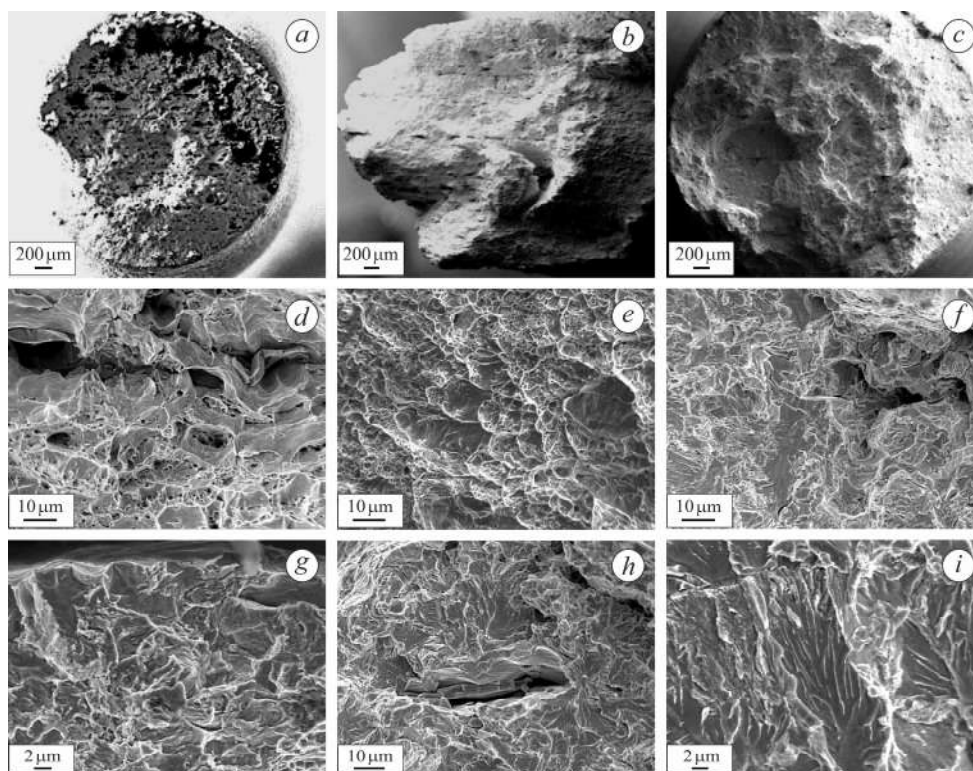


Рис. 5. Макро- (а–с) та мікрофрактограми (d–i) поперечних зразків експлуатованої сталі 17Г1С без (а, d) та після ПЕН (b, c, e–i) за режимами $i = 0,05$ (b, e, g) та 1 mA/cm^2 (c, f, h, i) перед розтягом зразків у повітрі, зафіксовані в межах центральної (d–f) та конічної (g–i) ділянок зламів.

Fig. 5. Macro- (a–c) and microfractograms (d–i) of transverse specimens of the operated 17G1C steel without (a, d) and after PCH (b, c, e–i) according to the modes $i = 0.05$ (b, e, g) and 1 mA/cm^2 (c, f, h, i) before specimen tension in air, recorded in the central (d–f) and conical (g–i) sections of fractures.

ВИСНОВКИ

Досліджено сталь 17Г1С з труб резерву та після експлуатації 38 років на транзитному газопроводі. Експлуатованій властиві нижчі пластичність та ударна в'язкість за практично незмінної міцності, що у поєднанні з висновками метало- та фрактографічного аналізів дало підстави обґрунтовано припустити її експлуатаційну деградацію. Металографічно зафіксовано значну кількість неметалевих включень, орієнтованих уздовж напрямку вальцювання. Виявлено незначне їх розтріскування, причому тільки частина з них зберігала хоча б неповну когезію з матрицею. Ударна в'язкість чутливіша до зміни стану сталі, ніж пластичність. З одного боку, вона істотно нижча для експлуатованої сталі, а з іншого – особливо відчутно на поперечних зразках. Текстурованість зламів поперечних зразків обох варіантів сталі розшаруваннями очевидніша, ніж поздовжніх. Деякі із них виходили на поверхню механічного надрізу, що може свідчити про їх існування ще перед випробами на удар внаслідок експлуатаційної деградації. За помірного наводнювання сталь труби запасу практично не схильна до водневого окрихчення за розтягу як поздовжніх, так і поперечних зразків. Така риса проявилася тільки за високоінтенсивного наводнювання поперечних зразків. Експлуатована сталь схильна до водневого окрихчення за випроб і поздовжніх, і поперечних зразків. Аналіз за показником *HES* виявив значний вплив текстури сталі на її водневу

крихкість. Порівнянням фрактографічних особливостей руйнування експлуатованої сталі встановлено, що помірне наводнювання посилює зсувні процеси з ознаками міжзеренного руйнування в околі ділянок, що прилягали до берегів поздовжніх розшарувань на зламі сталі. Тоді як за високоінтенсивного на зламі виявляли типові ознаки крізьзеренного відколу. Отримані відмінності пояснено різними шляхами транспортування водню в сталі після різної інтенсивності ПЕН перед розтягом зразків у повітрі.

Дослідження виконано за грантової підтримки проєкту № 2022.01/0099 Національним фондом досліджень України.

1. Hanley E. S., Deane J., and Gallachóir B. Ó. The role of hydrogen in low carbon energy futures – A review of existing perspectives // *Renew. Sust. Energ. Rev.* – 2018. – **82**. – P. 3027–3045. DOI: 10.1016/j.rser.2017.10.034
2. Gondal I. A. Hydrogen integration in power-to-gas networks // *Int. J. Hydrog. Energy.* – 2019. – **44**, № 3. – P. 1803–1815. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.164
3. Kappes M. A. and Perez T. Hydrogen blending in existing natural gas transmission pipelines: a review of hydrogen embrittlement, governing codes, and life prediction methods // *Corros. Rev.* – 2023. – **41**, № 3. – P. 319–347. DOI: 10.1515/correv-2022-0083
4. Saeedmanesh A., Mac Kinnon M. A., and Brouwer J. Hydrogen is essential for sustainability // *Electrochemistry.* – 2018. – **12**. – P. 166–181. DOI: 10.1016/j.coelec.2018.11.009
5. Pluvinae 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 steel pipeline infrastructure for gaseous hydrogen storage and transport: A review of factors affecting hydrogen induced degradation / A. Laureys, R. Depraetere, M. Cauwels, T. Depover, S. Hertelé, and K. Verbeken // *J. Nat. Gas Sci.* – 2022. – **101**. – Article number 104534. DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104534
7. Neacsu A., Eparu C. N., and Stoica D. B. Hydrogen–natural gas blending in distribution systems – An energy, economic, and environmental assessment // *Energies.* – 2022. – **15**, № 17. – Article number 6143. – P. 1–26. DOI: 10.3390/en15176143
8. 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
9. A review of hydrogen embrittlement in gas transmission pipeline steels / J. Hoschke, M. F. W. Chowdhury, J. Venezuela, and A. Atrens // *Corros. Rev.* – 2023. – **41**, № 3. – P. 277–317. DOI: 10.1515/correv-2022-0052
10. A review on hydrogen embrittlement and risk-based inspection of hydrogen technologies / A. Campari, F. Ustolin, A. Alvaro, and N. Paltrinieri // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2023. – **48**, № 90. – P. 35316–35346. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.05.293
11. Impact of long term operation on the reliability and durability of transit gas pipelines / I. Okipnyi, L. Poberezhny, V. Zapukhliak, A. Hrytsanchuk, L. Poberezhna, A. Stanetsky, V. Kravchenko, and I. Rybitskyi // *Strojnický Casopis.* – 2020. – **70**, № 1. – P. 115–126. DOI: 10.2478/scjme-2020-0011
12. Shinohara Y., Besson J., and Madi Y. Anisotropic damage behavior in high-strength line pipe steels // *Int. J. Offshore Polar Eng.* – 2012. – **22**, № 1. – P. 83–89.
13. Investigation of the hydrogen-induced cracking behaviour of API 5L X65 pipeline steel / T. A. Jack, R. Pourazizi, E. Ohaeri, J. Szpunar, J. Zhang, and J. Qu // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2020. – **45**, № 35. – P. 17671–17684. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.211
14. Tekkaya B., Dölz M., and Münstermann S. Modeling of local hydrogen concentration on microscopic scale to characterize the influence of stress states and non-metallic inclusions in pipeline steels // *Int. J. Hydrogen Energy.* – 2024. – **50**, Part A. – P. 1274–1287. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.158
15. Механізм розвитку пошкодженості низькоміцної трубної сталі через наводнювання під час експлуатації / О. І. Звірко, М. І. Греділь, О. Т. Цирульник, О. З. Студент, Г. М. Никифорчин // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2023. – **59**, № 3. – С. 54–59.

16. *Методика оцінювання впливу газоподібного водню на корозію та наводнювання сталей* / О. І. Звірко, М. І. Греділь, О. Т. Цирульник, О. І. Венгринюк, Г. М. Никифорчин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2023. – **59**, № 5. – С. 10–17.
17. *Оцінювання водневої крихкості експлуатованої трубної сталі методом J -інтеграла* / О. Т. Цирульник, О. З. Студент, О. І. Звірко, Д. О. Демянчук, О. І. Венгринюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2023. – **59**, № 6. – С. 48–55.
18. *Effect of hydrogen charging on the mechanical properties of advanced high strength steels* / T. Depover, D. Pérez Escobar, E. Wallaert, Z. Zermout, and K. Verbeken // Int. J. Hydrogen Energy. – 2014. – **39**, № 9. – P. 4647–4656. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.12.190
19. *Martin M. L. and Sofronis P. Hydrogen-induced cracking and blistering in steels: A review* // J. Nat. Gas Eng. – 2022. – **101**. – Article number 104547. DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104547
20. *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
21. *Recent progress in microstructural hydrogen mapping in steels: quantification, kinetic analysis, and multi-scale characterization* / M. Koyama, M. Rohwerder, C. C. Tasan, A. Bashir, E. Akiyama, K. Takai, D. Raabe, and K. Tsuzaki // Mater. Sci. Tech. – 2017. – **33**, № 13. – P. 1481–1496. DOI: 10.1080/02670836.2017.1299276
22. *Assessment of resistance to fatigue crack growth of natural gas line pipe steels carrying gas mixed with hydrogen* / M. Dadfarnia, P. Sofronis, J. Brouwer, and S. Sosa // Int. J. Hydrogen Energy. – 2019. – **44**, № 21. – P. 10808–10822. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.216
23. *Khoma M. S. Problems of fracture of metals in hydrogen-sulfide media* // Materials Science. – 2010. – **46**, № 2. – P. 190–200. DOI: 10.1007/s11003-010-9277-1
24. *Відмінності структури та властивостей металу балки мостової конструкції* / Г. В. Кречковська, А. А. Войтович, А. Р. Дзюбик, Б. І. Кіндрацький, О. С. Лампіцький, Л. І. Богун // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2023. – **59**, № 6. – С. 72–77.
25. *In-service degradation of mechanical characteristics of pipe steels in gas mains* / H. V. Krechkovs'ka, O. T. Tsyryl'nyk, and O. Z. Student // Strength of Mat. – 2019. – **51**, № 3. – P. 406–417. DOI: 10.1007/s11223-019-00087-4
26. *Comparison of hydrogen embrittlement in three pipeline steels in high pressure gaseous hydrogen environments* / N. E. Nanninga, Y. S. Levy, E. S. Drexler, R. T. Condon, A. E. Stevenson, and A. J. Slifka // Corros. Sci. – 2012. – **59**. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.01.028
27. *Role of hydrogen in operational degradation of pipeline steel* / H. Nykyforchyn, O. Tsyryl'nyk, O. Zvirko, and M. Hredil // Proc. Struct. Integrity. – 2020. – **28**. – P. 896–902. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.11.060
28. *Modelling hydrogen migration and trapping in steels* / M. A. Stopher, P. Lang, E. Kozeschnik, and P. E. Rivera-Diaz-del-Castillo // Mater. Des. – 2016. – **106**. – P. 205–215. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.05.051
29. *On a mechanism for enhanced hydrogen flux along grain boundaries in metals* / G. S. Mogilny, V. N. Shyvanuk, S. M. Teus, L. M. Ivaskevich, and V. G. Gavriljuk // Acta Mater. – 2020. – **194**. – P. 516–521. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.05.005
30. *Analysis of hydrogen permeation tests considering two different modelling approaches for grain boundary trapping in iron* / A. Díaz, I. I. Cuesta, E. Martinez-Pañeda, and J. M. Alegre // Int. J. Fract. – 2020. – **223**. – P. 17–35. DOI: 10.1007/s10704-019-00411-8
31. *Thomas A. and Szpunar J. A. Hydrogen diffusion and trapping in X70 pipeline steel* // Int. J. Hydrogen Energy. – 2020. – **45**, № 3. – P. 2390–2404. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.096

Одержано 05.12.2023