

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2024.06.021>

УДК 539.42:620.1:661.96

В. Л. Богданов¹, <https://orcid.org/0000-0001-9864-9120>

З. Т. Назарчук², <https://orcid.org/0000-0003-0402-0570>

О. І. Звірко², <https://orcid.org/0000-0002-6973-6804>

¹ Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, Київ, Україна

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

E-mail: bogdanov@nas.gov.ua, zinoviy.nazarchuk@gmail.com, olha.zvirko@gmail.com

Особливості застосування підходів фізико-хімічної механіки для оцінювання крихкості феритно-перлітних сталей

Представлено академіком НАН України Є. І. Крижанівським

В статті встановлено низку нових аспектів у застосуванні підходів механіки для оцінювання крихкості феритно-перлітних сталей з огляду підвищення ризиків порушення цілісності газопроводів, пов'язаних з транспортуванням водню у рамках розвитку водневої енергетики України. Опрацьовано механізм дії спричинених воднем напружень як чинників деформаційного старіння та мікропошкоженості деформаційної природи у низькоміцних сталях. Показано високу ефективність використання підходів нелінійної механіки руйнування для оцінювання стану сталей з урахуванням деструктивного впливу водню та умов експлуатації. Значну увагу надано особливостям реалізації механізму декогезії у міжфазному розшиаруванні сталей.

Ключові слова: сталь, руйнування, міцність, механічні властивості, тріщиностійкість, метод J-інтеграла, воднева крихкість, деградація.

Вступ. Одним із важливих аспектів розвитку водневої енергетики є транспортування водню. Найперспективнішим способом вважають трубопровідний транспорт, зокрема з використанням діючих газопроводів [1]. Вагома частка магістральних газопроводів України, що виготовлені з феритно-перлітних сталей, має значний термін експлуатації. При оцінюванні можливості безпечного транспортування водню трубопроводами з терміном експлуатації 30 років та більше необхідно враховувати не тільки потенційно негативний вплив транспортованого водню на механічні властивості сталей [2–9], але також їх експлуатаційну деградацію [10, 11], що може супроводжуватися окрихченням, розвитком по-

Цит у в а н н я: Богданов В.Л., Назарчук З.Т., Звірко О.І. Особливості застосування підходів фізико-хімічної механіки для оцінювання крихкості феритно-перлітних сталей. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2024. № 6. С. 21–30. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2024.06.021>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

шкодженості на нано- та мікрорівні, зниженням опору крихкому руйнуванню тощо. Під час транспортування водню інтенсивність наводнювання та окрихчення металу може посилюватися [1, 12]. Тому необхідним етапом діагностики стану газопроводів та обґрунтування їх роботоздатності в умовах транспортування водню є аналіз поточних фізико-механічних властивостей сталей. Ступінь окрихчення металу оцінюють за зміною певних механічних властивостей (показників пластичності, ударної в'язкості та опору росту тріщини) під дією окрихчувальних чинників. Найбільш чутливими до крихкості металу вважають параметри тріщиностійкості [1, 2, 5–9]. Для низькоміцних і, відповідно, високопластичних сталей застосовують метод J -інтегралу нелінійної механіки руйнування [1, 8, 9, 13]. Відомі дослідження механізмів взаємодії феритно-перлітних сталей з воднем виконані здебільшого для сталей у стані постачання [2–9] та не враховують вплив умов їх тривалої експлуатації на зміну стану металу.

Мета роботи — аналіз впливу водню на деформування, окрихчення та руйнування феритно-перлітних трубних сталей з урахуванням їх тривалої експлуатації.

Воднево-деформаційна мікропошкодженість у низькоміцних феритно-перлітних сталях. Серед розмаїття механізмів деструктивної дії водню на здатність сталей до деформування та руйнування [4] розглядають його пасткування у мікродефектах з утворенням у них напружень, співмірних за рівнем від механічного навантаження. Для низькоміцних сталей (API 5L X42 — API 5L X52, 17Г1С та ін.) це створює передумови для інтенсифікації мікропошкодженості. Загалом високоміцні сталі здебільшого високочутливі до водневої крихкості та розтріскування за дії водню, тоді як низькоміцні — імунні до дії водню. Однак для тривало експлуатованих (деградованих за механізмом мікропошкодженості) сталей ця закономірність може бути іншою. Аналізуючи механічну ситуацію на мікрорівні, бачимо, що підвищена пластичність, властива низькоміцним сталям, сприяє релаксації пікових напружень. Це утруднює досягнення критичної комбінації з концентрацією водню, необхідної для водневого мікророзтріскування. Однак тривала експлуатація сталей порушує зазначене загальне правило — в низькоміцних сталях виявляють інтенсивну мікропошкодженість і високу схильність до водневого мікро- і макророзтріскування [11]. Тобто, низькоміцна сталь, слабо чутлива до водневої крихкості у стані постачання, набуває такої чутливості під час експлуатації, що посилює ризик порушення цілісності трубопроводів при транспортуванні водню.

Висунуто гіпотезу про полегшений розвиток в об'ємі саме низькоміцних сталей розсіяної дефектності за механізмом деформування матеріалу під впливом високого тиску водню, рекомбінованого у дефектах. На розвиток дефектів впливають складові мікроструктури, зокрема, неметалеві включення (НВ), орієнтовані у напрямку вальцювання, на межах яких з матрицею формуються нанорозмірні пори, які є ефективними пастками водню. Водень, з одного боку, послаблює когезію між включенням та матрицею (рис. 1, а), а з іншого — акумулюється у порах та інших несучільностях, що зумовлює розшарування між складовими мікроструктури та наступну деформацію металу під тиском рекомбінованого водню. З часом такі дефекти розвиваються до значних розмірів (рис. 1, б). Схематично представлений на рис. 1, в мікродефект ілюструє розшарування по внутрішньому контуру 1 (у наведеному прикладі між НВ і матрицею), тоді як по зовнішньому контуру 2 — деформаційний механізм розвитку дефекту. Віддаль і, відповідно, об'єм порожнини між контуром дефекту і включенням є незначними, що полегшує акумулювання водню ви-

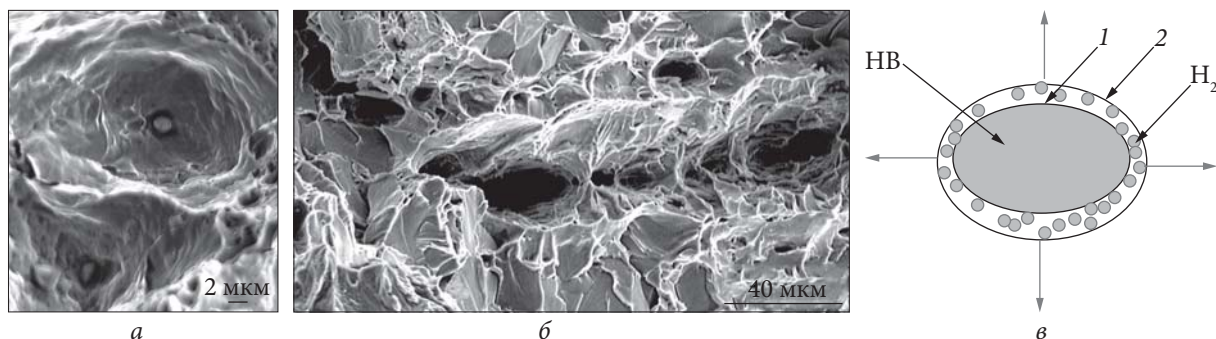


Рис. 1. Фрактограми (а, б) та схема (в), що ілюструють відшарування НВ від матриці (а), дефекти воднево-деформаційної природи (б) та їх формування (в): НВ — неметалева включення; H₂ — молізований водень

сокого тиску. Отже, розвиток мікропошкодженості низькоміцних сталей, полегшений воднем, супроводжується поєднанням деформаційного механізму з декогезивним. Як наслідок, навіть низькоміцна сталь з високим ступенем розвитку об'ємної мікропошкодженості відзначається низьким опором крихкому руйнуванню (зокрема, ударна в'язкість зразків Шарпі зі сталі 17Г1С після 40 років експлуатації складає 125 Дж/см² проти 206 Дж/см² для її вихідного стану). Таким чином, чутливість низькоміцних феритно-перлітних тривало експлуатованих сталей до водневої крихкості пов'язана з реалізацією воднево-деформаційного механізму розвитку дефектності.

Деформаційне старіння феритно-перлітних грубних сталей за дії водню. Високий рівень напружень у сталях, викликаний воднем, може впливати як чинник окрихчення на їх деформаційне старіння. Фізична природа деформаційного старіння полягає в осіданні атомів вуглецю та азоту на дислокаціях, що утруднює пластичну деформацію металу. Відповідно до ДСТУ 9166:2021 у лабораторних умовах для визначення схильності металу до старіння, та, відповідно, окрихчення, його піддають попередній пластичній деформації, яка є джерелом генерування дислокацій, та наступному нагріванню (250 °С) для дифузії елементів втілення до ядер дислокацій.

Висунуто гіпотезу про можливість реалізації деформаційного старіння і без попереднього механічного навантаження, якщо сталь зазнала наводнювання. Водень у сталі є джерелом створення напружень як чинника генерування дислокацій. Взято до уваги, що напруження, зумовлені наводнюванням, будуть спричиняти мікропластичну деформацію лише у певних структурно обумовлених локальних місцях як пріоритетних для дифузії водню та його акумулювання. Гіпотезу підтвердили експериментально на феритно-перлітній сталі 17Г1С, яку досліджували у трьох станах: 1) у вихідному; 2) після низькотемпературного відпуску за температури 250 °С впродовж 1 год (B250); 3) після електролітичного наводнювання (ЕН) та наступного низькотемпературного відпуску за тим самим режимом (ЕН + B250). ЕН реалізували у розчині H₂SO₄ (рН = 2) за густини катодного струму $i = 50 \text{ mA/cm}^2$ тривалістю 100 год. Для атестації сталі у зазначених станах визначили її механічні властивості: границі плинності $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_B , відносне звуження ψ , ударну в'язкість KCV, в'язкість руйнування $J_{0,2}$ (значення J -інтегралу для приросту тріщини 0,2 мм відповідно до нормативного документу ASTM E 813 з використанням балкових зразків розміром 4x15x160 мм з одностороннім боковим надрізом і втомною тріщиною) та опір ко-

розійному розтріскуванню (КР) за зниженням пластичності (відносного звуження) за розтягу гладких зразків у корозивному розчині NS4 (табл. 1). Останній оцінили за показником $\beta_{\text{КР}} = (1 - \psi_{\text{NS4}} / \psi_{\text{пов}}) \cdot 100\%$, де ψ_{NS4} , $\psi_{\text{пов}}$ — відносне звуження зразків за випробовування розтягом у корозивному середовищі та повітрі, відповідно. Зразки вирізали у поздовжньому до осі труби напрямку. Швидкість деформування зразків 10^{-3} с^{-1} у повітрі та 10^{-6} с^{-1} у розчині NS4, відповідно. Хімічний склад розчину NS4, г/л: 0,122 KCl, 0,483 NaHCO₃, 0,181 CaCl₂·2H₂O та 0,131 MgSO₄·7H₂O.

Застосування режиму В250 практично не вплинуло на досліджувані властивості сталі. Однак сталь, піддана обробці за режимом ЕН + В250, характеризувалась нижчими в'язкістю руйнування та, особливо, опором крихкому руйнуванню. Це вказує на те, що режим локального деформаційного старіння за участі водню (ЕН + В250) не вплинув на властивості сталі на макрорівні, незначно знизив їх на мезо- ($J_{0,2}$) та найвідчутніше — на мікрорівні (опір КР $\beta_{\text{КР}} = 25\%$).

Особливості застосування підходів нелінійної механіки руйнування для оцінювання крихкості сталей за дії водню. Підходи механіки руйнування вважаються найефективнішими для оцінювання опору крихкому, в тому числі воднево-механічному, руйнуванню сталей [13]. Найчастіше використовують в'язкість руйнування (статичну тріщиностійкість), як важливу розрахункову механічну характеристику. Застосовуючи підходи нелінійної механіки руйнування (метод J -інтеграла), згідно з вимогами стандарту ASTM E 813 при навантаженні зразків з попередньо наведеними втомними тріщинами оцінювали

Таблиця 1. Механічні властивості та опір крихкому руйнуванню сталі 17Г1С у різних станах за випробовування у повітрі (чисельник) та розчині NS4 (знаменник)

Стан металу	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ψ , %	KCV, Дж/см ²	$J_{0,2}$, Н/мм	$\beta_{\text{КР}}$ %
Постачання	428 / 429	531 / 529	71 / 69	129 / —	322 / —	— / 3
В250	433 / 431	535 / 538	72 / 68	125 / —	330 / —	— / 4
ЕН + В250	435 / 434	533 / 537	74 / 53	131 / —	286 / —	— / 25

Таблиця 2. Параметри тріщиностійкості J -інтеграл по старту тріщини J_0 та в'язкість руйнування K_{Jc} сталі 17Г1С залежно від її стану, орієнтації зразків відносно осі труби та впливу водню (швидкість навантаження 0,5 мм/хв)

Стан сталі	Умови випробовування	Орієнтація зразків	J_0 , Н/мм	K_{Jc} , МПа · м ^{1/2}
Вихідний	Без наводнювання	Поздовжні	90,2	143,4
		Поперечні	38,0	93,0
	Наводнювання	Поздовжні	85,4	139,5
		Поперечні	32,7	86,3
Експлуатований 38 років	Без наводнювання	Поздовжні	75,0	130,7
		Поперечні	49,8	106,5
	Наводнювання	Поздовжні	53,1	110,0
		Поперечні	40,3	95,8

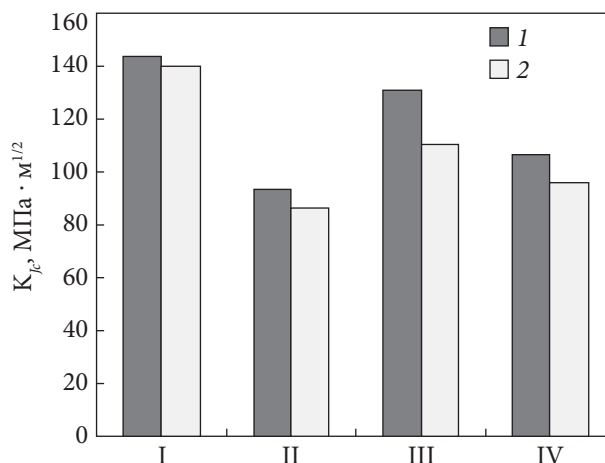


Рис. 2. В'язкість руйнування K_{Jc} (МПа·м^{1/2}) сталі 17Г1С у стані постачання (I, II) та після 38 років експлуатації (III, IV), визначена на поздовжніх (I, III) та поперечних (II, IV) зразках без (1) та після ЕН (2)

рівень J_0 , що відповідає старту тріщини. Його перераховували за відомою залежністю на критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Jc} .

Дослідили вплив водню на в'язкість руйнування феритно-перлітних сталей двох груп міцності з використанням методу J -інтеграла: 17Г1С (група міцності API 5L X52) та API 5L X67 у стані постачання (резервні труби) та після 38 (сталь 17Г1С) і 34 (сталь X67) років експлуатації на магістральних газопроводах. Труби мали зовнішні діаметри 1220 та 1420 мм і товщину стінок труби 12,0 та 18,7 мм для сталей 17Г1С та X67, відповідно. Механічні характеристики сталей: 17Г1С у стані постачання — $\sigma_B = 568$ МПа, $KCV = 129$ Дж/см², в експлуатованому — $\sigma_B = 570$ МПа, $KCV = 103$ Дж/см², сталі X67 у стані постачання — $\sigma_B = 577$ МПа, $KCV = 196$ Дж/см², в експлуатованому — $\sigma_B = 576$ МПа, $KCV = 154$ Дж/см². Використали балкові зразки з одностороннім боковим надрізом і втомною тріщиною розмірами 4×15×100 мм для сталі 17Г1С та 10×18×160 мм для сталі X67. Перед навантаженням згином їх електролітично наводнювали в розчині H₂SO₄ (рН1) + 10 г/л тіосечовини за густини струму $i = 0,05$ мА/см² тривалістю 120 год для 17Г1С та 100 год для X67. Особливістю експериментів було зниження швидкості навантаження (прогину попередньо наводнених зразків) від стандартної 0,5 мм/хв до 0,05 і 0,005 мм/хв. Це повинно сприяти дифузії водню у зону передруйнування в околі вершини тріщини і посилювати його дію.

За стандартної швидкості навантаження зразків (0,5 мм/хв) виявили незначне зниження в'язкості руйнування K_{Jc} сталі 17Г1С у стані постачання після її попереднього наводнювання (табл. 2). Водночас, для сталі в експлуатованому стані ці відмінності істотніші (рис. 2). Загалом, тріщиностійкість сталі 17Г1С у вихідному та експлуатованому станах відрізнялася незначно. При цьому за випробовування поздовжніх зразків зафіксували її зниження після тривалої експлуатації, тоді як за випробовування поперечних зразків отримали дещо вищі значення для експлуатованої сталі порівняно з металом у стані постачання як без наводнювання так і після нього. Сталі 17Г1С у стані постачання властива значна анізотропія в'язкості руйнування (значення для поздовжніх та поперечних зразків відрізняються на ~ 50 %, тоді як для експлуатованого металу — на ~ 23 %).

Для сталі X67 встановлено зниження тріщиностійкості за випробовування поперечних зразків після попереднього ЕН, інтенсивніше за нижчої швидкості навантаження зразків (табл. 3). Звідси J_0 та K_{Jc} як воднево-механічні параметри залежать як від умов наводнюван-

ня, так і умов механічного навантаження. Це загалом типово для корозійно-механічних та воднево-механічних показників опору руйнуванню сталей [2, 5, 7], оскільки враховують час впливу агресивних середовищ.

Подібно як і для сталі 17Г1С (табл. 2), на відміну до загальноприйнятої закономірності високої чутливості показників механіки руйнування до окрихчення сталей, виявлено незначні відмінності для вихідного та експлуатованого станів сталі Х67 у значенні J -інтегралу за стартом тріщини ненаводнених зразків та наводнених, однак випробуваних за порівняно високих швидкостей навантаження — 0,5 і 0,05 мм/хв (табл. 3). Така механічна поведінка сталей є неочікуваною, оскільки оцінки ударної в'язкості показали відчутну різницю в опорі крихкому руйнуванню для їх різних станів. Її пояснили на основі фрактографічного аналізу (рис. 3) тим, що експлуатованому металу властиве розшарування, яке ділило потенційну зону поширення попередньо наведеної втомної тріщини по товщині зразка (10 мм) на вузькі прошарки (1—2 мм), що спричинило зростання енергоємності руйнування окремих зразків «мінітовщини» і, як наслідок, макрозразка в цілому. Відомо [14], що поділ фронту тріщини (у цьому випадку — розшаруваннями) ослаблює напружений стан у вершині основної тріщини та, відповідно, зумовлює підвищення в'язкості руйнування. Це вказує на необхідність враховувати специфічну морфологію тріщин статичного підростання в експлуатованих сталях. Тому для подальшого розвитку досліджень складної морфології тріщин при використанні підходів нелінійної механіки руйнування перспективним слід вважати пропозицію [15] збагачення когезивної моделі критичним навантаженням показника тріщиностійкості як чинника розшарування. Важливо зазначити, що згадана модель оперує параметром когезивної міцності, рівень якого знижується, з одного боку, від умов тривалої експлуатації сталі [11], а з іншого — від її наводнювання [4].

За використання найменшої (0,005 мм/хв) швидкості прогину зразків отримано істотно нижче значення в'язкості руйнування для експлуатованої сталі після ЕН (86,7 МПа · м^{1/2} проти 103,5 МПа · м^{1/2} для експлуатованого металу та у стані постачання, відповідно). Це означає, що вплив експлуатації на стан сталі за показниками J_0 та K_{Jc} зафіксували лише за особливо жорстких умов прояву водневої крихкості, пов'язаної з інтенсивнішим акумулюванням водню в околі вершини тріщини. Можна припустити, що реалізація ще менших швидкостей навантаження зумовить ще сильніше водневе окрихчення металу зони передруйнування попереду вершини тріщини і, відповідно, подальший спад в'язкості руйнування.

Таблиця 3. Параметри тріщиностійкості J -інтеграл по старту тріщини J_0 (Н/мм, у чисельнику) та в'язкість руйнування K_{Jc} (МПа·м^{1/2}, в знаменнику) сталі API 5L X67 залежно від її стану, впливу водню та швидкості навантаження (поперечні зразки)

Стан сталі	Умови випробовування	Швидкість навантаження, мм/хв		
		$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Вихідний	Без наводнювання	188,0 / 207,0	—	—
	Наводнювання	147,0 / 183,0	113,0 / 160,5	47,0 / 103,5
Експлуатований 34 роки	Без наводнювання	176,0 / 200,3	—	—
	Наводнювання	150,0 / 185,0	114,0 / 161,0	33,0 / 86,7

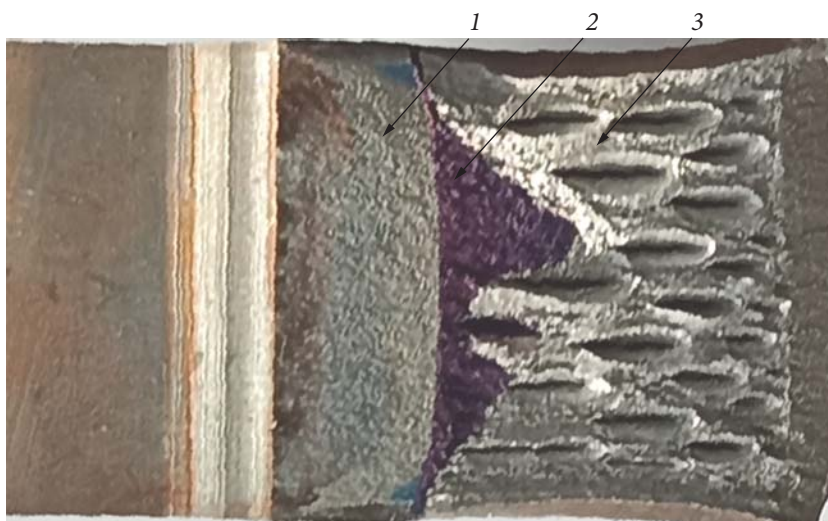


Рис. 3. Макрозлам зразка експлуатованої сталі X67 після випробування на в'язкість руйнування: 1 — зона втомного росту тріщини; 2 — зона статичного підростання тріщини; 3 — зона доламу зразка

Застосування методу J -інтеграла ефективно і для випадку електрохімічного механізму наводнювання сталі, який реалізується внаслідок корозійної взаємодії з вологою, конденсованою у локальних зонах трубопроводу [11], і посилюється за насичення газоподібним воднем [12]. Це моделює експлуатаційні умови транспортування водню на ділянках конденсації вологи на внутрішній поверхні труби. В'язкість руйнування сталі 17Г1С, визначена експериментально за таких умов наводнювання, є на $\sim 9\%$ нижчою, ніж без водню, тобто метал деградує за опором росту тріщини.

Отже, оцінювання стану тривало експлуатованих сталей газопроводів та їх робоздатності в умовах транспортування водню повинні, насамперед, ґрунтуватися на критерії експлуатаційного зниження їх опору крихкому руйнуванню за дії водню, зокрема, тріщиностійкості методом J -інтеграла. Для водневих трубопроводів регламентовано (відповідно до стандарту ASME B31.12) граничне значення тріщиностійкості $K_{Jc} = 55 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. Відповідно, сталі газопроводів з тріщиностійкістю вище цього значення можна у першому наближенні вважати придатними для транспортування водню. Обчислений граничний рівень J_0 склав $13,3 \text{ Н/мм}$. Базуючись на даних табл. 2 та 3, можна перекопатися у тому, що J -інтеграл для досліджених умов є вищим за критичний рівень тріщиностійкості. Подальші дослідження необхідно спрямувати на визначення тріщиностійкості сталей за нижчої швидкості навантаження наводнених зразків, де вплив водню може бути істотнішим, а також на вибіркові дослідження сталей з різних характерних ділянок трубопроводів за чутливими до водневої крихкості сталей показниками в'язкості руйнування.

Висновки. У контексті розвитку водневої енергетики загалом та викликів, пов'язаних з транспортуванням водню тривало експлуатованою газопровідною мережею України, встановлено низку нових аспектів у реалізації механізмів водневої крихкості феритно-перлітних трубних сталей. Обґрунтовано реалізацію декогезивно-деформаційного механізму формування мікропошкодженості в низькоміцних сталях під час тривалої експлуатації. Висунуто та експериментально підтверджено гіпотезу про можливість реалізації деформаційного старіння як стадії експлуатаційної деградації сталей і без зовнішнього механічного навантаження, якщо джерелом генерування дислокацій слугують внутрішні

напруження, спричинені наводнюванням. За допомогою експериментальних досліджень опору крихкому руйнуванню сталей, визначеного методом J -інтеграла, встановлено істотний вплив швидкості механічного навантаження зразків на тріщиностійкість за дії водню. Запропоновано підхід до оцінювання роботоздатності трубопроводів в умовах транспортування водню, який ґрунтується на критерії експлуатаційного зниження в'язкості руйнування сталей за дії водню, визначеного методом J -інтеграла.

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

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Pluvina G., Toth L., Capelle J. Effects of hydrogen addition on design, maintenance and surveillance of gas networks. *Processes*. 2021. **9**(7), art. no. 1219. <https://doi.org/10.3390/pr9071219>
2. Briottet L., Moro I., Lemoine P. Quantifying the hydrogen embrittlement of pipeline steels for safety considerations. *Int. J. Hydrog. Energy*. 2012. **37**(22). P. 17616—17623. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.143>
3. Skal's'kyi V.R., Nazarchuk Z.T., Hirnyi S.I. Effect of electrolytically absorbed hydrogen on Young's modulus of structural steel. *Mater. Sci.* 2013. **48**(4). P. 491—499. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9529-y>
4. Ohaeri E., Eduok U., Szpunar J. Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review. *Int. J. Hydrog. Energy*. 2018. **43**(31). P. 14584—14617. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.064>
5. Depover T., Pérez Escobar D., Wallaert E., Zermout Z., Verbeken K. Effect of hydrogen charging on the mechanical properties of advanced high strength steels. *Int. J. Hydrog. Energy*. 2014. **39**(9). P. 4647—4656. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.190>
6. Boukortt H., Amara M., Hadj Meliani M., Bouledroua O., Muthanna B.G.N., Suleiman R.K., Sorour A.A., Pluvina G. Hydrogen embrittlement effect on the structural integrity of API 5L X52 steel pipeline. *Int. J. Hydrog. Energy*. 2018. **43**(42). P. 19615—19624. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.149>
7. Chatzidouros E. V., Traidia A., Devarapalli R. S., Pantelis D. I., Steriotis T. A., Jouiad M. Effect of hydrogen on fracture toughness properties of a pipeline steel under simulated sour service conditions. *Int. J. Hydrog. Energy*. 2018. **43**(11). P. 5747—5759. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.186>
8. Cabrini M., Sinigaglia E., Spinelli C., Tarenzi M., Testa C., Bolzoni F. M. Hydrogen embrittlement evaluation of micro alloyed steels by means of J -integral curve. *Mater.* 2019. **12**, art. no. 1843. <https://doi.org/10.3390/ma12111843>
9. Madi Y., Santana L. M., Belkacemi S., Farrugia V., Meddour A., Marchais P.-J., Bertin M., Furtado J. Mechanical characterization of hydrogen embrittlement in a gaseous environment: An innovative test setup using sub-size specimens. *Eng. Fail. Anal.* 2024. **162**, art. no. 108362. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108362>
10. Kryzhaniv's'kyi E.I., Nykyforchyn H.M. Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs. *Mater. Sci.* 2011. **47**(2). P. 127—136. <https://doi.org/10.1007/s11003-011-9390-9>
11. Nykyforchyn H., Zvirko O., Tsyurulnyk O., Kret N. Analysis and mechanical properties characterization of operated gas main elbow with hydrogen assisted large-scale delamination. *Eng. Fail. Anal.* 2017. **82**. P. 364—377. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.07.015>
12. Zvirko O.I., Hredil M.I., Tsyurulnyk O.T., Venhryniuk O.I., Nykyforchyn H.M. Method of assessing the influence of gaseous hydrogen on corrosion and hydrogenation of steels. *Mater. Sci.* 2024. **59**(5). P. 524—531. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00807-5>
13. Nazarchuk Z.T., Nykyforchyn H.M. Structural and corrosion fracture mechanics as components of the physico-chemical mechanics of materials. *Mater. Sci.* 2018. **54**. P. 7—21. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0151-x>
14. Venkateswara Rao K.T., Yu W., Ritchie R.O. Cryogenic toughness of commercial aluminum-lithium alloys: Role of delamination toughening. *Metall. Trans. A*. 1989. **20**. P. 485—497. <https://doi.org/10.1007/BF02653929>
15. Богданов В.Л., Селіванов Д.М. Дослідження впливу параметрів тріщиностійкості на критичне навантаження зразка з тріщиною нормального відриву при триточковому згині в рамках когезійної моделі. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2024. № 5. С. 53—61. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2024.05.053>

Надійшло до редакції 19.11.2024

REFERENCES

1. Pluvinage, G., Toth, L., & Capelle, J. (2021). Effects of hydrogen addition on design, maintenance and surveillance of gas networks. *Processes*, 9, No. 7, 1219. <https://doi.org/10.3390/pr9071219>
2. Briottet, L., Moro, I., & Lemoine, P. (2012). Quantifying the hydrogen embrittlement of pipeline steels for safety considerations. *Int. J. Hydrogen Energy*, 37, No. 22, pp. 17616-17623. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.143>
3. Skal's'kyi, V.R., Nazarchuk, Z.T., & Hirnyi, S.I. (2013). Effect of electrolytically absorbed hydrogen on Young's modulus of structural steel. *Mater. Sci.*, 48, No. 4, pp. 491-499. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9529-y>
4. Ohaeri, E., Eduok, U., & Szpunar, J. (2018). Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review. *Int. J. Hydrog. Energy*, 43, No. 31, pp. 14584-14617. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.064>
5. Depover, T., Pérez Escobar, D., Wallaert, E., Zermout, Z., & Verbeken, K. (2014). Effect of hydrogen charging on the mechanical properties of advanced high strength steels. *Int. J. Hydrogen Energy*, 39, No. 9, pp. 4647-4656. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.190>
6. Boukortt, H., Amara, M., Hadj Meliani, M., Bouledroua, O., Muthanna, B.G.N., Suleiman, R.K., Sorour, A.A., & Pluvinage, G. (2018). Hydrogen embrittlement effect on the structural integrity of API 5L X52 steel pipeline. *Int. J. Hydrogen Energy*, 43, No. 42, pp. 19615-19624. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.149>
7. Chatzidouros, E. V., Traidia, A., Devarapalli, R. S., Pantelis, D. I., Steriotis, T. A., & Jouiad, M. (2018). Effect of hydrogen on fracture toughness properties of a pipeline steel under simulated sour service conditions. *Int. J. Hydrogen Energy*, 43, No. 11, pp. 5747-5759. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.186>
8. Cabrini, M., Sinigaglia, E., Spinelli, C., Tarenzi, M., Testa, C., & Bolzoni, F.M. (2019). Hydrogen embrittlement evaluation of micro alloyed steels by means of J-integral curve. *Mater.*, 12, art. no. 1843. <https://doi.org/10.3390/ma12111843>
9. Madi, Y., Santana, L. M., Belkacemi, S., Farrugia, V., Meddour, A., Marchais, P.-J., Bertin, M., & Furtado, J. (2024). Mechanical characterization of hydrogen embrittlement in a gaseous environment: An innovative test setup using sub-size specimens. *Eng. Fail. Anal.*, 162, art. no. 108362. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108362>
10. Kryzhaniv's'kyi, E.I., & Nykyforchyn, H.M. (2011). Specific features of hydrogen-induced corrosion degradation of steels of gas and oil pipelines and oil storage reservoirs. *Mater. Sci.*, 47, No. 2, pp. 127-136. <https://doi.org/10.1007/s11003-011-9390-9>
11. Nykyforchyn, H., Zvirko, O., Tsyurulnyk, O., & Kret, N. (2017). Analysis and mechanical properties characterization of operated gas main elbow with hydrogen assisted large-scale delamination. *Eng. Fail. Anal.*, 82, pp. 364-377. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.07.015>
12. Zvirko, O.I., Hredil, M.I., Tsyurulnyk, O.T., Venhryniuk, O.I., & Nykyforchyn, H.M. (2024). Method of assessing the influence of gaseous hydrogen on corrosion and hydrogenation of steels. *Mater. Sci.*, 59, No. 5, pp. 524-531. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00807-5>
13. Nazarchuk, Z.T., & Nykyforchyn, H.M. (2018). Structural and corrosion fracture mechanics as components of the physicochemical mechanics of materials. *Mater. Sci.*, 54, pp. 7-21. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0151-x>
14. Venkateswara Rao, K.T., Yu, W., & Ritchie, R.O. (1989). Cryogenic toughness of commercial aluminum-lithium alloys: Role of delamination toughening. *Metall. Trans. A*, 20, pp. 485-497. <https://doi.org/10.1007/BF02653929>
15. Bogdanov, V.L., Selivanov, D.M. (2024). Study of the impact of crack resistance parameters on the critical load of a specimen with a mode I crack under three-point bending in the framework of the cohesive zone model. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, No. 5, pp. 53-61 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/dopovid2024.05.053>

Received 19.11.2024

V.L. Bogdanov¹, <https://orcid.org/0000-0001-9864-9120>

Z.T. Nazarchuk², <https://orcid.org/0000-0003-0402-0570>

O.I. Zvirko², <https://orcid.org/0000-0002-6973-6804>

¹ S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

E-mail: bogdanov@nas.gov.ua, zinoviy.nazarchuk@gmail.com, olha.zvirko@gmail.com

PECULIARITIES OF THE APPLICATION OF PHYSICO-CHEMICAL MECHANICS APPROACHES FOR THE EVALUATION OF EMBRITTLEMENT OF FERRITIC-PEARLITIC STEELS

The presented study establishes new aspects of application of fracture mechanics approaches to assess embrittlement of ferrite-perlitic steels in connection with the increased risks of gas pipelines integrity violation related to hydrogen transportation within the framework of hydrogen energy development in Ukraine. The mechanism of action of hydrogen-induced stresses as factors of deformation aging and microdamage of deformation character in low-strength steels has been investigated. The realization of decohesion-deformation mechanism of microdamage formation in low-strength steels at long-term operation is substantiated. The hypothesis about the possibility of realization of deformation aging as a stage of operational degradation of steels without external mechanical loading, if the source of dislocation generation is internal stresses caused by hydrogenation, has been put forward and experimentally confirmed. The high efficiency of using nonlinear fracture mechanics approaches to assess the condition of steels taking into account the destructive effect of hydrogen and operating conditions has been shown. The hypothesis about the possibility of realization of deformation aging as a stage of operational degradation of steels without external mechanical loading, if the source of dislocation generation is internal stresses caused by hydrogenation, has been put forward and experimentally confirmed. The high efficiency of using nonlinear fracture mechanics approaches to assess the condition of steels taking into account the destructive effect of hydrogen and operating conditions has been shown.

Keywords: steel, fracture, strength, mechanical properties, fracture toughness, J-integral method, hydrogen embrittlement, degradation.