

УДК 621.791.11:693

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОДНЮ І СІРКИ НА СУЛЬФІДНО-КОРОЗІЙНЕ РУЙНУВАННЯ ПІД НАПРУЖЕННЯМ ТРУБОПРОВОДІВ

В.Д. Макаренко¹,

д-р техн. наук, професор

В.І. Гоц²,

д-р техн. наук, професор

Ю.В. Макаренко³,

магістерка

О.Е. Чигиринець⁴,

д-р техн. наук, професор

В.І. Савенко²,

д-р техн. наук, професор

¹*Херсонський національний технічний університет, Україна*²*Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна*³*Медичний університет провінції Манітоба, м. Вінніпег, Канада*⁴*Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Україна*

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.112.294-301

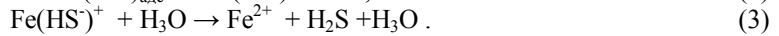
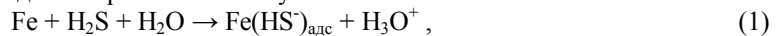
Уперше проведені комплексні експериментальні дослідження впливу водню і сірки на сульфідно-корозійне руйнування під напруженням (СКРН) трубних сталей в корозійно-агресивному середовищі NACE В дослідженнях використовували дослідні сталі марок 06Г2БА і 08ХМЧА які широко використовують на будівництві трубопроводів різного призначення. Для успішної реалізації поставлених задач спеціально була розроблена і апробована в лабораторних умовах аналітична система (аналізатор нестационарних процесів –АНП), в яку була інтегрована установка для випробувань на корозійно-механічне розтріскування під напруженням. Уперше проведені комплексні експериментальні дослідження зразків трубних сталей марок 06Г2БА і 08ХМЧА під впливом сірки і водню, що дозволило розвинути уявлення стосовно механізмів СКРН і воднем ініційоване руйнування (ВІР). Уперше проведені експериментальні дослідження кінетики корозії сталей 06Г2БА і 08ХМЧА в залежності від терміну випробувань в модельному середовищі NACE, при цьому визначені три періоди формування продуктів корозії. Встановлено, що на швидкість росту корозійних тріщин СКРН сильний вплив здійснюють сірка і водень, які розчинені в трубних дослідних сталях, що дозволило визначити оптимальний вміст сірки і водню в сталі 06Г2БА. Показано на базі результатів експериментальних досліджень, що для забезпечення високої тріщиностійкості трубних сталей в умовах статичного і циклічного навантажень як на повітрі, так і в умовах корозійно-агресивних середовищ вміст сірки не повинен перевищувати 0.015-0.020%, а розчиненого водню – 2-3 ppm. Отримані результати дозволяють удосконалювати трубні сталі в процесі їх виплавки на металургійних підприємствах завдяки використанню економного модифікування ніобієм, хромом, церієм та іншими домішками, які сприяють роздрібненню структури і зменшують вміст неметалевих включень та шкідливих домішок.

Ключові слова: тріщиностійкість, розтріскування, сульфіди, водень, сірка.

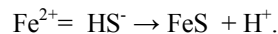
Вступ. Відомо [1-21], що сірка-водень (H_2S) відносяться до небезпечних домішок в технологічних середовищах нафтових і особливо газових родовищ. Він суттєво пришвидшує корозію корозійно-водневе і корозійно-механічне руйнування трубних сталей нафтогазових об'єктів. Для роботи технологічного обладнання і трубопроводів в корозійно-активних сірка-водень-місних середовищах застосовують конструкційні сталі, які характеризуються високим спротивом специфічним видам руйнуванням - сульфідно-корозійне руйнування під напруженням (СКРН) і воднем ініційоване руйнування (ВІР), а також ефективні методи і засоби їх протикорозійного захисту. Це особливо актуально для нафтогазової промисловості України країн Середньої Азії, Канади, США, де родовища нафти і газу містять високу (часто до 30 %)

концентрацію сірка-водню. Особливістю трубопроводів є те, що по ним транспортують різноманітні по складу і змісту продукти. Багатокомпонентність і багатофазність транспортіваних середовищ, їх висока хімічна агресивність по відношенню до металу в умовах сильної динамічності приводять до корозійного руйнування, особливо внутрішньої поверхні трубопроводів. В процесі транспортування відбувається розшарування води від нафти і її зосередження в нижній частині трубопроводів, що створює умови для виникнення нерівномірної електрохімічної корозії внутрішньої поверхні труб, яка спричиняє кратери, виразки, пітинги та інші ушкодження, що в результаті приводить до стоншення стінки труб.

Із літератури [1, 2, 3-9] і практики відомо, що H_2S суттєво пришвидшує корозію і наводнювання заліза і сталі. Існують дві точки зору на механізм такого впливу H_2S , зокрема – утворення поверхневих каталізаторів і плівок з низькою захисною здатністю. Згідно першої гіпотези уявлення про вплив H_2S на електродні реакції базуються на припущенні утворення проміжних з'єднань, які грають роль поверхневих каталізаторів. Так, посилення катодної реакції іонізації заліза сірка-воднем виражається наступною схемою:



Даний комплекс розкладається і сірка-водень регенерується. Під час утворення хемосорбованого каталізатора $Fe(HS)_{алс}$ на поверхні металу міцний зв'язок атомів Fe і S приводить до послаблення зв'язку між атомами металу, що полегшує їх іонізацію. Цьому сприяє також пониження приелектродної концентрації іонів Fe^{2+} внаслідок взаємодії з сульфідами по реакції



Це приводить до підвищення швидкості анодного процесу, тобто полегшується розрив зв'язку між атомами металу в кристалічній решітці. На думку О.І. Радкевича і В.І. Похмурського [21] гіпотеза поверхневих сульфідних каталізаторів передбачає адсорбцію іонів HS^- з наступною дисоціацією ювенільної поверхні металу.

Як вважають І.К. Походня і В.І. Швачко [20], водень, звільнений при дисоціації адсорбованих аніонів, хемо-сорбуються на локально-активних місцях заліза з утворенням шару від'ємних іонів. Така локалізація від'ємного заряду на поверхні, до того ж в місці зародження корозійної мікротріщини, приводить до полегшення розриву максимально напружених міжатомних зв'язків. Тому дану гіпотезу можна використовувати для пояснення результатів при порівняльних короткочасних випробуваннях металу, коли плівка продуктів корозії на поверхні відсутня.

Таким чином, до цих пір нема єдиною думки стосовно корозійних руйнувань під впливом сірки і водню при одночасній дії напружень. Тому для глибокого розуміння механізмів СКРН і ВІР були додатково проведені експериментальні дослідження.

Ціль роботи – експериментальні дослідження впливу сірки і водню на СКРН і ВІР трубних конструкційних сталей.

Методика та матеріали досліджень В якості матеріалів експериментальних випробувань використовували економно модифіковану сталь 06Г2БА, яку до того ж в піддавали контрольованій прокатці (СКП) і регульованому пришвидшеному охолодженню (РПрО), що дозволяло отримати дрібнозернисту структуру з мініальною кількістю неметалевих включень глобулярної форми. Модифікація дослідної сталі ніобієм в процесі виплавки дозволило підвищити міцність сталі до класу X70. В роботі використовували ще дисперсно-твердіочу сталь 17Г1С-У, покращену за рахунок спеціальної термічної обробки (загартування + високий відпуск). Для порівняння результатів використовували також леговану церієм сталь 08ХМЧА. В якості модельного середовища застосовували модель NACE (5% NaCl + 0.5% CH_3COOH + насичення H_2S [1, 2].

Корозійно-механічні випробування проводили на удосконаленій установці з дистанційно-автоматизованим управлінням (рис. 1). Ця дослідна установка для корозійних досліджень на кручення дозволяє проводити дослідження при постійній деформації, при постійному навантаженні і пері одночасній зміні цих параметрів. Трубочатий зразок 3 з робочими розмірами $d_{зов}=18$ мм; $d_{внутр}=15$ мм; $l_{роб} = 100$ мм встановлюється в нерухомі захоплювачі на дні посудини 2 з розчином. Посудина 2 жорстко закріплюється на основі 1 установки. До верхнього

кінця зразку прикріплена трубчаста тяга 4, на кінці якої встановлено колесо 5, з'єднане гнучкими тросиками з динамометрами 6, жорстко закріпленими на основі 1. Навантаження зразків здійснюється шляхом натягування тросиків за допомогою штурвалів 7 з двох сторін. При цьому відбувається згин манометрів, по прогину яких (виміряється чутливими індикаторними головками 13) визначається зусилля в тросиках, крутний момент і напруження в зразках. До нижнього і верхнього кінців зразку приварюються два подовжувачі 9 і 10, один з яких (10) проходить всередині зразку. На виступаючих кінцях подовжувачів закріплені два важелі 11, по переміщенню кінців яких виміреному індикаторними головками 12, визначається кут закручування зразка, тобто його деформація. Посуд із зразком нагрівається за допомогою електронагрівуючого пристрою 15, температура розчину контролюється і регулюється за допомогою електроконтактного термометра 14. В кришці посудини встановлено зворотний холодильник 8. В цьому випадку в процесі випробувань на стійкість проти корозійного руйнування з великою точністю визначається рівень напружень і деформацій в зразках в любий момент часу, що дозволяє оцінити вплив різних поєднань пластичних і пружних деформацій на корозійне розтріскування металу.

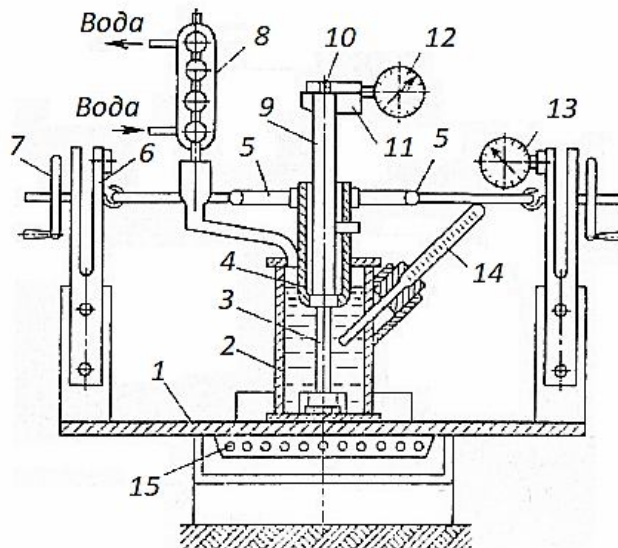


Рис. 1. Удосконалена установка для випробувань зразків труб на корозійне розтріскування при крученні; 1 – зразок; 2 – посудина; 3 – трубка; 4 – трубчаста тяга; 5 – колесо; 6 – динамометр; 7 – осцилограф; 8 – клема; 9, 10 – подовжувачі; 11 – електронагрівуючий пристрій; АНП – аналізатор нестационарних процесів; ПУ – пульт дистанційного управління

Залежності критичного розтягу чого напруження від вмісту водню в сталі досліджували на установці моделі “1251” фірми “Інстрон” (Великобританія). Металографічні випробування зразків після їх випробувань проводили на електронному сканую чому мікроскопі фірми “Джеол” (Японія).

Результати досліджень і їх обговорення. СКРН досліджували в середовищі NACE при статичному розтягуванні циліндричних зразків діаметром 6.4 мм, довжиною 75.4 мм. тривалістю 720 год при температурі 220C. Характер тріщин СКРН наведений на рис. 2. Результати комплексних експериментальних досліджень наведені на рис. 3-7.

На рис. 3 зображені залежності швидкості корозії трубних сталей 06Г2БА і 08ХМЧА від терміну випробувань в середовищі NACE, де мають місце три області: I - період невисокого зростання корозії; II – період різкого зростання корозії; III - період стабілізації чи монотонного зменшення корозії. Мабуть, спочатку (період I) відбувається формування плівки продуктів корозії (сульфіду заліза FeS), які володіють захисними властивостями. В подальшому на стадії зростання швидкості корозії (період II) підвищується вміст сірки в поверхневій плівці з утворенням піриту чи марієнзиту (FeS₂) і руйнуванням троїлиту (FeS). В III періоді формується плівка канзиту (Fe₉S₈) з низькою захисною здатністю.

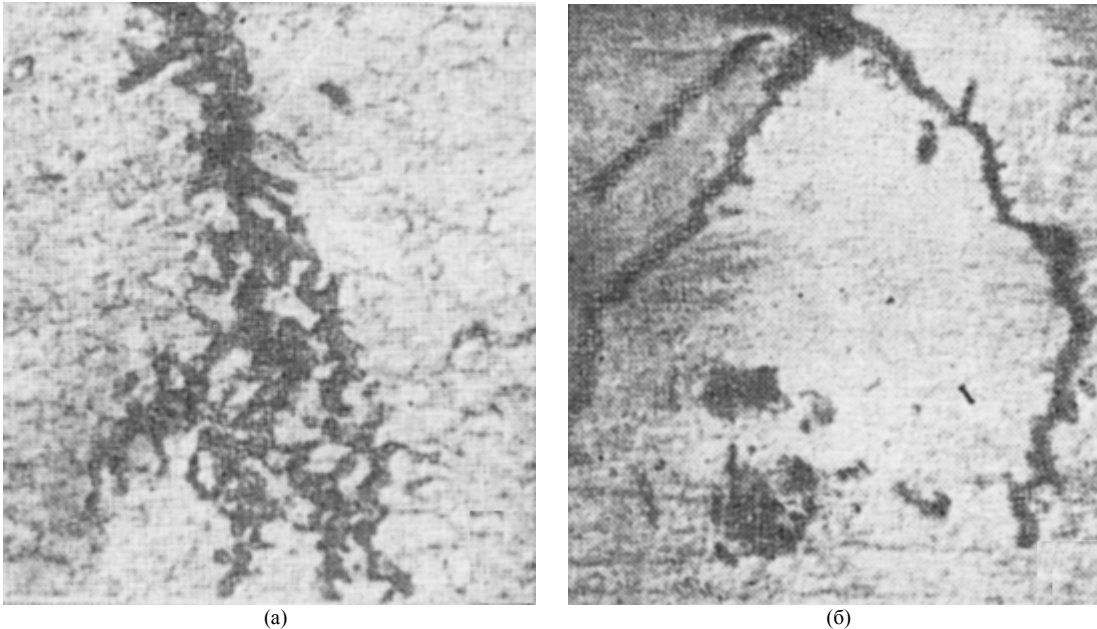


Рис. 2. Характер тріщотворень під напруженням в трубних сталях марки 06Г2БА (а) і 08ХМЧА (б)

Для отримання кількісних даних про хімічний склад продуктів сірка-водневої корозії труб (на прикладі труб НКТ нафтових свердловин НАК “Укрнафгаз”) був проведений їх аналіз на присутність окислів і втрату легких фракцій при нагріві. Крім того, були проведені аналітичні розрахунки можливих варіантів хімічного складу продуктів корозії з різними типами сульфідів. Результати експериментів і аналітичних розрахунків наведені в таблиці 1.

З таблиці видно, що вміси сульфідів складає 40-43%, а оксидів – 3.1-5.1%, тобто приблизно по половині кожного. Таким чином, продукти H_2S - корозії представляють собою плівку, яка складається із сульфідів і окислів, що сприяє анодному розчиненню сталі і її наводнюванню.

В той же час вплив сірки і водню сильно відображається на кінетиці росту тріщин в дослідних зразках сталі 06Г2БА. Оптимальною концентрацією для сірки є вміст менше 0.020%, а водню відповідно 1.5-5 ppm (рис. 4).

Схильність сталі 06Г2БА до сульфідного розтріскування показана на рис. 5. Аналіз результатів наведених на рис. 5 показує, що для забезпечення високої тріщиностійкості в умовах статичних і циклічних навантажень як на повітрі, так і корозійно-агресивних середовищах, вміст сірки не повинен перевищувати 0.015-0.020%, а залишкового водню – 2-3 ppm.

Для дослідження тріщиностійкості трубної сталі 06Г2БА в залежності від кількості розчинених в металі сірки і водню додатково за допомогою стандартної методики визначали

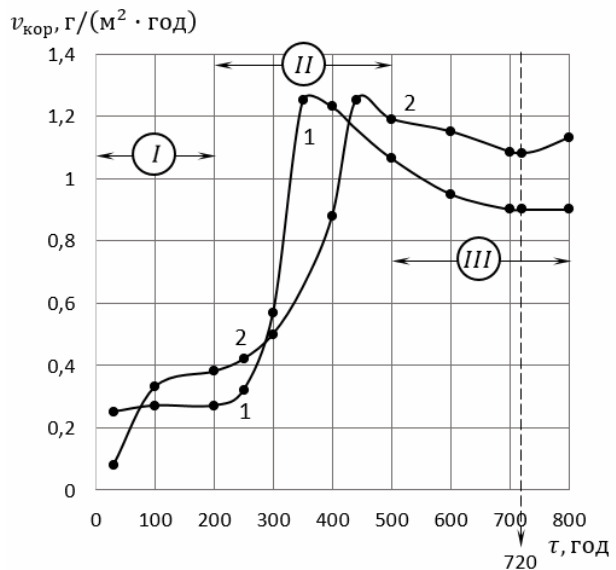


Рис. 3. Зміна швидкості корозії трубних сталей 06Г2БА (2) і 08ХМЧА (1) з терміном випробувань в середовищі NACE. Позначення: I, II, III – періоди формування продуктів корозії

значення критичних розтягуючи напружень зразків, вирізаних з труб. Результати випробувань викладені на рис. 6. Видно, що критичний вміст сірки $S_{кр}$ в металі залежить від кількості розчиненого водню: із збільшенням концентрації водню від 1.5 до 5.0 ppm, величина $S_{кр}$ зменшується від 0.015 до 0.006%. Величина $S_{кр}$ відповідає критичному значенню розтягуючих напружень, при якому відбувається зародження і ріст тріщини аж до руйнування.

Таблиця 1

Експеримент	Розрахунок
$Fe_{сум} - 52.85\%$	Варіант 1 - $FeS : FeS - 40.25\%$
$\Sigma S_{сум} - 15.1\%$	$Fe(SO_4)_3 - 1.76\%$; $Fe_3O_4 - 35.79\%$
$S_{сульфід} - 14.66\%$	Варіант 2 - $FeS_2 ; FeS_2 - 27.45\%$
$S_{сульфат} - 0.44\%$	$Fe(SO_4)_3 - 1.76\%$; $Fe(SO_4)_3 - 51.64\%$
Легкі речовини:	Варіант 3- Fe_9S_8
$25^{\circ}C - 2.32\%$	$Fe_9S_8 - 43.44\%$
$40^{\circ}C - 9.71\%$	$Fe(SO_4)_3 - 1.76\%$
$60^{\circ}C - 9.77\%$	$Fe_3O_4 - 31.39\%$

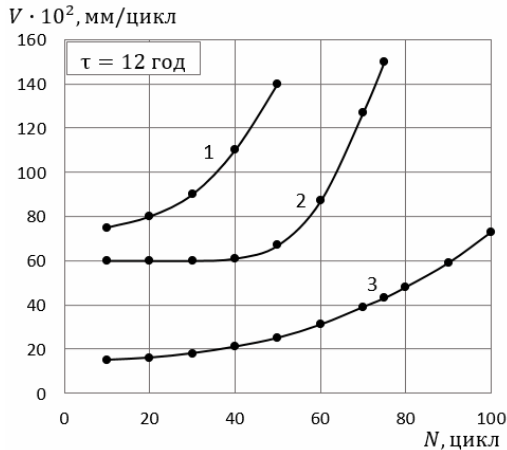


Рис. 4. Швидкість росту тріщин в дослідних зразках із змінним вмістом сірки і водню 1 – 15 ppm [H]; 0.085% [S]; 2 – 5.0 ppm [H], 0.0050% [S]; 3 – 1.5 ppm [H], 0.0020% [S]; Сталь 06Г2БА

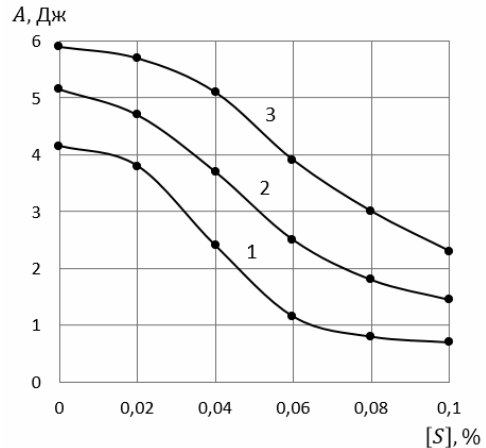


Рис. 5. Робота руйнування зразків зі змінним вмістом розчиненої сірки [S]. Середовище NACE: вміст залишкового водню [H], ppm: 1 – 1.5; 2 – 3.0; 3 – 5.0

Звертає на себе увагу те, що границя критичних напружень спричиняючи зародження і ріст мікротріщини може максимально підвищеним при оптимальному поєднанні низьких вмістів розчинених в металі сірки (не більше 0.020%) і водню (не більше 3.0 ppm).

Результати випробувань на втомлену міцність трубних сталей в залежності від терміну експлуатації трубопроводів наведені на рис. 7.

Звідки видно, що з ростом терміну експлуатації трубопровідних конструкцій зменшується втомлена міцність, особливо така тенденція чітко проявляється після 15-20 років експлуатації. Дослідження проводили на повітрі.

Висновки

1. Розроблена і апробована в лабораторних умовах аналітична система (аналізатор нестационарних процесів – АНП), в яку інтегрована установка для випробувань на корозійно-механічне розтріскування під напруженням.

2. Уперше проведені комплексні експериментальні дослідження зразків трубних сталей марок 06Г2БА і 08ХМЧА під впливом сірки і водню, що дозволило розвинути уявлення стосовно механізмів СКРН і ВІР.

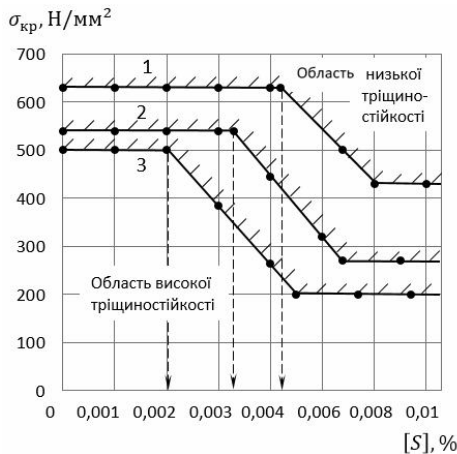


Рис. 6. Залежність критичного розтягуючого напруження від вмісту розчиненої сірки в сталі. Вміст залишкового водню [H]_{зал}, ppm: 1–1.5; 2–3.5; 3–9.0; Сталь 06Г2БА

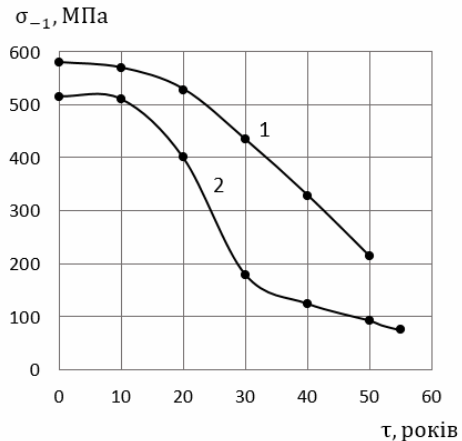


Рис. 7. Залежність тривалої міцності (втомленості) від терміну експлуатації трубопроводів: 1 – сталь 06Г2БА; 2 – сталь 17Г1С-У

3. Уперше проведені експериментальні дослідження кінетики корозії сталей 06Г2БА і 08ХМЧА в залежності від терміну випробувань в модельному середовищі NACE, при цьому визначені три періоди формування продуктів корозії..

4. Встановлено, що на швидкість росту корозійних тріщин СКРН сильний вплив здійснюють сірка і водень, які розчинені в трубних дослідних сталях, що дозволило визначити оптимальний вміст сірки і водню в сталі 06Г2БА.

5. Показано на базі результатів експериментальних досліджень, що для забезпечення високої тріщиностійкості трубних сталей в умовах статичного і циклічного навантажень як на повітрі, так і в умовах корозійно-агресивних середовищ вміст сірки не повинен перевищувати 0.015-0.020%, а розчиненого водню – 2-3 ppm.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Савенко В.І., Владимиров О.В., Макаренко Ю.В. Експериментальні дослідження кінетики росту тріщин та несучої здатності трубних сталей підземних систем водовідведення // Опір матеріалів і теорія споруд: Вип. №110.-2023, С.469-482.
2. Макаренко Ю.В., Савенко В.І., Горлач О.М., Задорожнікова О.В., Чигиринець О.Е., Победа С.С. Дослідження кінетики росту тріщин під дією статичних і динамічних навантажень трубних сталей в корозійно-агресивному середовищі NACE // Опір матеріалів і теорія споруд: Вип. №110.-2023. С. 520-532.
3. NACE Standard TM01-77(90). Standard Test Method. Laboratory Testing of Metals Resistance to Sulfide Stress Cracking in H₂S Environments // NACE. – Houston. P.O. BOX 218340.1990.-22 p.
4. Okada T., Hattori S. Relation Between Concentration of Salt Water and Corrosion Fatigue Strength on 0.37 Percent Carbon Structural Steel, Fukui University, Японія: Теоретические основы инженерных расчетов (Труды Американского общества инженеров-механиков); изд-во Мир, 1985, №3, С.98-107.
5. Макаренко В.Д., Крижанівський Є.І., Чернов В.Ю. Проблеми корозійної стійкості промислових трубопроводів// Нафтова і газова промисловість. -2002.-№6.-С.42-44.
6. Самойленко М.І. Функціональна надійність трубопроводних транспортних систем// Харків: ХНАМП. – 2009.-184с
7. Насоніна Н.Г., Антоненко С.Є. Аналіз пошкодженості водопровідних і каналізаційних мереж// Сучасне промислове та цивільне будівництво. -2019.-Том15.-№1.-С23-34
8. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Аргатенко Т.В. і ін. Дослідження аварійних трубопроводів // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, вип. 42. -2023.-С.49-58.
9. Бриду А., Лафранс М., Прову И. Разработка новых сортов стали с повышенными характеристиками для транспорта кислого газа и нефти// Нефтегаз-Франция –ЮзичорАсье, 1986. -19с.
10. Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної трубної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами/ О. Чапля, О. Радкевич, О. П'ясецький, Я. Спектор // Машинознавство. -1999.-№8.- С52-56.
11. Основні закономірності наводнювання та поверхневого пухиріння трубної сталі в сірководневих середовищах / О. Радкевич, Г. Чумало, І. Доминюк і ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 2004. - Спец. вип. № 4, т. 1. - С. 446-449.
12. Tyson W.R. Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Dislocation Interactions // Corrosion. - 1980. Vol. 36, No. 8. - Pp. 441-443.
13. Ford F.P. Stress Corrosion Cracking in Advances in Corrosions Science-1, Ed., R.N.Parkins, Applied Science Publishers, 2002.
14. Кавакубо Т., Хісида М. Розрахунок прискореного навоколишнім середовищем росту тріщини для неіржавіючої сталі у воді високої температури на основі механіки пружно-пластичного руйнування // Journal of Engineering Materials and Technology, 1995, Vol.107, p.240-245.

15. Макаренко В.Д. Експериментальні випробування трубопроводів // Ніжин:НДУ ім.Миколи Гоголя, 2020.-543с.
16. Макаренко В.Д., Стогній О.В., Гоц В.І. і ін. Полігонні випробування газопроводів. Монографія// Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя. -2023. – 160 с.
17. Макаренко В.Д., Білик С.І., Чигиринець О.Е. і ін. Кінетика тріщино утворення в сталевих конструкціях// Київ:НУБіП України. -2023. -248 с.
18. Мешков Ю.Я. Физические основы разрушения стальных конструкций // Киев: Наукова думка. -1981.-284 с.
19. Макаренко В.Д., Стогній О.В., Гоц В.І. і ін. Натурні випробування трубопроводів. Монографія// Ніжин: НДУ ім. М.Гоголя. -2023. – 154 с.
20. Влияние водорода на хрупкость конструкционных сталей и сварных соединений / И.К. Походня, В.И.Швачко, С.А. Котречко и др. // Автомат сварка. – 1989.- №5. – С. 1 – 4.
21. Коррозионно-механическое разрушение сварных конструкций / В.И. Похмурский,Р.К. Мелехов, Г.М. Круцан и др.// Киев: Наукова думка.- 1995. – 391 с.

REFERENCES

1. Makarenko V.D., Gots V.I., Savenko V.I., Vladimirov O.V., Makarenko Yu.V. Eksperymentalni doslidzhennia kinetyky rostu trishchyn ta nesuchoi zdatnosti trubnykh stali pidzemnykh system vodovidvedennia (Experimental studies of crack growth kinetics and bearing capacity of pipe steels of underground drainage systems) // Opir materialiv i teoriia sporud: Vyp. №110.- 2023, S. 469-482.
2. Makarenko Yu.V, Savenko V.I, Gorchach O.M, Zadorozhnikova O.V., Chygyrynets O.E., Pobeda S.S. Doslidzhennia kinetyky rostu trishchyn pid diieiu statychnykh i dynamychnykh navantazhen trubnykh stali v koroziino-ahresyvnomu sereдовyshchi NASE (Study of the kinetics of crack growth under the action of static and dynamic loads of pipe steels in a corrosive-aggressive environment NACE) // Opir materialiv i teoriia sporud: Vyp. №110.- 2023, S. 520-532.
3. NACE Standard TM01-77(90). Standard Test Method. Laboratory Testing of Metals Resistance to Sulfide Stress Cracking in H₂S Environments // NACE. – Houston. P.O. BOX 218340.1990.-22 p.
4. Okada T., Hattori S. Relation Between Concentration of Salt Water and Corrosion Fatigue Strength on 0.37 Percent Carbon Structural Steel, Fukui University, Yaponiia: Teoretychni osnovy inzhenernykh rozrakhunkiv (Pratsi Amerykanskohto tovarystva inzheneriv-mekhaniky); yzd-vo Myr, 1985, №3, S. 98-107.
5. Makarenko V.D., Kryzhanivskiy E.I., Chernov V.Yu. Problemy koroziinoi stiiikosti promyslovykh truboprovodiv (Problems of corrosion resistance of industrial pipelines) // Naftova i hazova promyslovist. -2002.-№6.-S. 42-44.
6. Samoilenko M.I. Funktsionalna nadiinist truboprovodnykh transportnykh system (Functional reliability of pipeline transport systems) // Kharkiv: KhNAMP. – 2009.-184s.
7. Nasonina N.G., Antonenko S.E. Analiz poshkodzhenosti vodoprovodnykh i kanalizatsiinykh merezh (Damage analysis of water supply and sewage networks) // Suchasne promyslove ta tsyvilne budyvnytstvo. -2019.-Tom15.-№1.-S. 23-34.
8. Makarenko V.D., Gots V.I., Argatenko T.V. Doslidzhennia avariinykh truboprovodiv (Investigation of emergency pipelines) // Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky, vyp. 42. -2023.-S. 49-58.
9. Bridu A., Lafrance M., Provo I. Rozrobka novykh sortiv staly z pidvysychenyi kharakterystykamy dlia transportu kysloho hazu ta nafty (Development of new grades of steel with increased characteristics for the transport of acid gas and oil) // Naftohaz-Frantsiia-YuzichorAsie, 1986. - 19 s.
10. Chaplya O., Radkevich O., Pyasetskiy O., Spector Ya. Porivnialnyi analiz koroziino-mekhanichnykh vlastyivostei vitchyznianoi trubnoi stali 20YuCh z inozemnyimi analohamy (Comparative analysis of corrosion-mechanical properties of domestic pipe steel 20YCH with foreign analogues) // Mashynoznavstvo. -1999.-№8. – S. 52-56.
11. Radkevich O., Chumalo G., Dominyuk I. and others. Osnovni zakonimirnosti navodniuvannia ta poverknevoho pukhyrinnia trubnoi stali v sirkovodnykh sereдовyshchakh (Basic patterns of waterlogging and surface blistering of pipe steel in hydrogen sulfide environments) // Fiz.-khim. mexanikamaterialiv. - 2004. - Spets. vyp. № 4, t. 1. - S. 446-449.
12. Tyson W.R. Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Dislocation Interactions // Corrosion. - 1980. Vol. 36, No. 8. - Pp. 441-443.
13. Ford F.P. Stress Corrosion Cracking in Advances in Corrosions Science-1, Ed., R.N.Parkins, Applied Science Publishers, 2002.
14. Kawakubo T., Hisida M. Rozrakhunok pryskorenoho navkolyshnim sereдовyshchem rostu trishchyny dlia neirzhaviiuchoi stali u vodi vysokoi temperatury na osnovi mekhaniky pruzhno-plastychnoho ruinuвання (Calculation of environmentally accelerated crack growth for stainless steel in high-temperature water based on elastic-plastic fracture mechanics) // Journal of Engineering Materials and Technology, 1995, Vol.107, p. 240-245.
15. Makarenko V.D. Eksperymentalni vyprobuвання truboprovodiv (Experimental testing of pipelines) // Nizhyn:NDU im.Mykoly Hoholia, 2020.-543s.
16. Makarenko V.D., Stognii O.V., Gots V.I. Polihonni vyprobuвання hazoprovodiv (Polygon tests of gas pipelines) Monohrafiia// Nizhyn: NDU im. M.Hoholia. -2023. – 160 s.
17. Makarenko V.D., Bilyk S.I., Chihyrynets O.E. Kinetyka trishchyno utvorennia v stalevykh konstruksiiakh (Kinetics of crack formation in steel structures) // Kyiv:NUBIP Ukrainy. -2023. -248 s.
18. Meshkov Yu.Ya. Fizychni zasady ruinuвання stalevykh konstruksii (Physical principles of destruction of steel structures) // Kyiv: Naukova dumka. -1981.-284 s.
19. Makarenko V.D., Stognii O.V., Gots V.I. Nатурni vyprobuвання truboprovodiv (Field tests of pipelines) Monohrafiia// Nizhyn: NDU im. M.Hoholia. -2023. – 154 s.
20. Pokhodnia I.K., Shvachko V.I., Kotrechko S.A. Vplyv vodniu na krykhhkist konstruksiiinykh stali ta zvarynykh ziednan (The effect of hydrogen on the brittleness of structural steels and welded joints) // Avtomat zvaryuvannia. - 1989. - №5. - S. 1 - 4.
21. Pokhmurskiy V.I., Melekhov R.K., Krutsan H.M. Koroziino-mekhanichne ruinuвання zvarynykh konstruksii (Corrosion-mechanical destruction of welded structures) // Kyiv: Naukova dumka. - 1995. - 391 s.

Makarenko V.D., Gots V.I., Makarenko Y.V., Chygyrynets' O.E., Savenko V.I.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF HYDROGEN AND SULFUR ON SULFIDE-CORROSION DESTRUCTION UNDER TENSION OF PIPELINES

For the first time, comprehensive experimental studies of the influence of hydrogen and sulfur on sulphide stress corrosion cracking (SCR) of pipe steels in a corrosive-aggressive environment of NACE were carried out. In the research, experimental steels of the 06G2BA and 08KHMCHA brands, which are widely used in the construction of pipelines for various purposes, were used an analytical system (analyzer of non-stationary processes – ANP) was developed and tested in laboratory conditions, into which the installation for tests on corrosion-mechanical cracking under stress was integrated. For the first time, comprehensive experimental studies of pipe steel samples of grades 06G2BA and 08KHMCHA under the influence of sulfur and hydrogen were carried out, which made it possible to develop an understanding of the mechanisms of SCDS (sulphide-corrosion destruction under stress) and HID (hydrogen-initiated destruction). For the first time, experimental studies of the corrosion kinetics of 06G2BA and 08KHMCHA steels were carried out depending on the duration of the tests in the NACE model environment, while three periods of the formation of corrosion products were determined. It was found that sulfur and hydrogen, which are dissolved in test pipe steels, have a strong influence on the growth rate of corrosion cracks of SCDS, which made it possible to determine the optimal content of sulfur and hydrogen in steel 06G2BA. It is shown on the basis of the results of experimental studies that to ensure high crack resistance of pipe steels under conditions of static and cyclic loads both in air and in conditions of corrosive-aggressive environments, the sulfur content should not exceed 0.015-0.020%, and the dissolved hydrogen content should not exceed 2-3 ppm. The obtained results make it possible to improve pipe steels in the process of their smelting at metallurgical enterprises thanks to the use of economical modification with niobium, chromium, cerium and other impurities, which contribute to the fragmentation of the structure and reduce the content of non-metallic inclusions and harmful impurities.

Keywords: crack resistance, cracking, sulfides, hydrogen, sulfur.

УДК 621.791.11:693

Макаренко В.Д., Гоц В.І., Макаренко Ю.В., Чигиринець О.Е., Савенко В.І. Експериментальні дослідження впливу водню і сірки на сульфідно-корозійне руйнування під напруженням трубопроводів // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 112. – С. 294-301.

Табл. 1. Іл. 7. Бібліогр. 21 назв.

UDC 621.791.11:693

Makarenko V.D., Gots V.I., Makarenko Y.V., Chygyrynets' O.E., Savenko V.I. Experimental studies of the influence of hydrogen and sulfur on sulfide-corrosion destruction under tension of pipelines // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA, 2024. – Issue 112. – P. 294-301.

Table 1. Fig. 7. Ref. 21.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор Херсонський національний технічний університет Макаренко Валерій Дмитрович

Тел.: +38(066) 747-67-90

E-mail: green555tree@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9178-9657>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури ГОЦ Володимир Іванович

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38(044) 248-30-16

E-mail: gots.vi@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-1609>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): магістерка університету Манітоби (м. Вінніпег, Канада) Макаренко Юлія Валеріївна

Тел.: +38(066) 747-67-90

E-mail: green555tree@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9113-428X>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор хімічних наук, професор кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Чигиринець Олена Едуардівна

Адреса робоча: КПІ ім. Ігоря Сікорського, пр. Берестейський, 37, корп. 4, Київ 03056

Тел.: +38(044)-204-83-89

E-mail: o.chygyrynets@kpi.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2506-7020>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор кафедри організації і управління будівництвом Київського національного університету будівництва і архітектури Савенко Володимир Іванович

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38(097)-970-66-59

E-mail: savenkoknuba@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1490-6730>