

Міністерство освіти і науки України

Національна академія наук України

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**«АКАДЕМІЧНА Й УНІВЕРСИТЕТСЬКА НАУКА:
РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ»,
присвячена 90-річчю Національного університету
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»**

Збірник наукових праць
за матеріалами

**XII Міжнародної
науково-практичної конференції**

6 грудня 2019 року

Полтава 2019

УДК 622.276.06

Максимов С.Ю., д.т.н., с.н.с.

Інститут електрозварювання імені Є.О.Патона НАНУ

<https://orcid.org/0000-0002-5788-0753>

Винников Ю.Л., д.т.н., професор

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2164-9936>. E-mail: vyunnykov@ukr.net

Макаренко В.Д., д.т.н., професор

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9178-9657> E-mail: leotar@ukr.net

Харченко М.О., к.т.н., доцент

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1621-2601> E-mail: kharchenkomo@ukr.net

Чичуліна К.В., к.т.н., доцент

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7448-0180> E-mail: chichulinak@ukr.net

Мангура А.М., старший викладач

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4113-1870> E-mail: mangura2000@gmail.com

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОЇ СТІЙКОСТІ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В СЕРЕДОВИЩАХ НАФТОВИХ РОДОВИЩ

Анотація. Існуючі науково-технічні і технологічні розробки стосовно забезпечення надійної корозійно-механічної стійкості і довговічності нафтогазопроводів та інших оболонкових металоконструкцій відповідального призначення і підвідомчих Державній службі гірничого нагляду та промислової безпеки України в значній частині знаходять протиріччя і невизначеність; відсутні кількісно обґрунтовані рекомендації практичного застосування з метою забезпечення корозійно-механічної стійкості трубопроводів, працюючих в технологічно-агресивних середовищах при знакозмінних температурно-барометричних умовах і навантаженнях; виникла необхідність системного вивчення причин, умов і механізмів корозійно-механічних ушкоджень тривалого експлуатованого обладнання, що дозволить значно підвищити експлуатаційну надійність промислового обладнання. Експериментальні дослідження дозволили встановити причини та обґрунтувати механізми знеміцнення металу зі збільшенням терміну експлуатації (від 0 до 25 років), що приводить до його деградації, особливо при довготривалій експлуатації в корозійних середовищах. Розроблено метод прогнозування залишкового робочого (безаварійного) ресурсу трубопровідних металоконструкцій, який дає можливість цілеспрямовано регулювати їх експлуатаційним станом. Це дозволяє своєчасно застосовувати технічні і конструкторсько-технологічні заходи для підвищення працездатності таких конструкцій. Отримані численні та різноманітні результати експериментальних випробувань металевих зразків різного призначення надають можливість створення бази для порівняльного аналізу сталей за багатьма параметрами тріщиностійкості.

Ключові слова: корозія, руйнування, сульфіди, деградація, напруження.

UDC 622.276.06

Maksimov Sergii, ScD

Paton Electric Welding Institute NASU

<https://orcid.org/0000-0002-5788-0753>

Vynnykov Yuriy, ScD, Professor

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2164-9936>. E-mail: vyunnykov@ukr.net

Makarenko Valerii, ScD, Professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9178-9657>. E-mail: leotar@ukr.net

Kharchenko Maksym, PhD, Associate professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1621-2601> E-mail: kharchenkomo@ukr.net

Chichulina Kseniia, PhD, Associate professor

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7448-0180> E-mail: chichulinak@ukr.net

Manhura Andrii, lecturer

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4113-1870> E-mail: mangura2000@gmail.com

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"

INVESTIGATION OF CORROSION-MECHANICAL RESISTANCE OF PIPE STEELS OF LONG-TERM OPERATION IN OIL FIELD ENVIRONMENTS

Abstract. *The existing scientific-technical and technological developments to ensure reliable corrosion-mechanical resistance and durability of oil and gas pipelines and other shell structures for critical applications and under the State service of mining supervision and industrial safety of Ukraine in large part to find contradictions and uncertainty; no quantitatively based recommendations of practical application to ensure corrosion-mechanical resistance of pipelines operating in a technologically-aggressive media under alternating temperature and barometric conditions and loads; arose the need for a systematic study of the causes, conditions and mechanisms of corrosion-mechanical damage long operating equipment that will significantly improve the operational reliability of industrial equipment. Experimental studies have allowed to establish the causes and justify the mechanisms of metal softening with an increase in service life (from 0 to 25 years), which leads to its degradation, especially during long-term operation in corrosive environments. A method of forecasting the residual working (accident-free) resource of pipeline metal structures, which makes it possible to purposefully regulate their operational condition, has been developed. This allows timely application of technical and design and technological measures to improve the performance of such structures. Numerous and diverse results of experimental tests of metal samples for various purposes are obtained. they provide an opportunity to create a base for comparative analysis of steels in many parameters of crack resistance.*

Keywords: *corrosion, destruction, sulfides, degradation, stress*

Освоєння і експлуатація нафтогазових родовищ України із складними інженерно-геологічними умовами обумовлюють особливі вимоги до якості труб, зварювально-монтажних і ізоляційних робіт при будівництві нафтогазопроводів, які представляють собою складні технічні системи. Руйнування таких конструкцій, як правило, приводить до суттєвих економічних і екологічних наслідків, в результаті чого експлуатація нафтогазопроводів пов'язана з небезпекою для обслуговуючого персоналу, населення та навколишнього середовища і має свої проблеми. Аналіз літературних даних [1 - 5, 7, 10 - 13, 15] і результатів власних багаторічних спостережень показує, що основні проблеми промислової безпеки і надійності трубопровідних конструкцій пов'язані з тривалим терміном їх експлуатації.

Відповідно існуючій нормативній документації [6, 8, 9, 14] на стадії проектування промислових нафтопроводів і виготовлення труб не передбачається розрахункова оцінка спротиву метала крихкому руйнуванню з урахуванням локальної тріщиностійкості метала під впливом сірчано-водневої деградації його структурних складових. Нормується тільки рівень пластичності метала у вихідному стані по відносному значенню ударної в'язкості [3]. Використання тільки одного параметра ударної в'язкості в якості основної характеристики тріщиностійкості трубних сталей не гарантує безаварійну роботу трубопроводів. Більш того, в процесі експлуатації в хімічно-агресивних середовищах при одночасній дії знакозмінних навантажень на стінках труб появляются дефекти, розвиваються тріщини, знеміцнюється і окричується метал в результаті втомних процесів і деформаційного старіння. З причини відсутності достовірних критеріїв оцінки залишкового ресурсу промислових трубопроводів, не представляється можливим точно прогнозувати їх надійність і приймати рішення щодо подальшого використання. А тому в даній роботі викладені результати багаторічних експериментальних досліджень, які можуть бути покладені в основу нового підходу у вирішенні важливої і складної проблеми: подовження безаварійної, тривалої експлуатації трубопровідних і в цілому оболонкових конструкцій, який включить використання в нормативно-регламентуючій документації сучасних критеріїв тріщиностійкості, чутливих до

зміни структури в локальних областях металу в процесі корозійно-водневої деградації при тривалій експлуатації. Велика увага в роботі привернута дослідженню впливу різних чинників на критерії тріщиностійкості, які характеризують спротив металу крихкому руйнуванню, а також адекватно відображають специфічний вид сірководневої корозії – сульфідне корозійне розтріскування під напруженням (СКРН).

Відомо, що проблемами тріщиностійкості та окрихчення металів, які експлуатуються в корозійних середовищах з домішками сірководню на промислах нафтогазових родовищ, займалися як вітчизняні та зарубіжні вчені [1, 2, 4, 10, 12, 15, 20 - 28, 30, 16, 17, 22, 23, 24, 29]. Аналіз літературних джерел свідчить про те, що існуючі вітчизняні і зарубіжні методики розрахунку на міцність трубопроводів і резервуарів, як правило, передбачають незалежне протікання процесів корозії, втомності і повзанні, хоча на практиці ці процеси проходять одночасно в різних сполученнях. Крім того, аналіз існуючих методів неруйнівного контролю пошкоджень і деградації металу показує їх низьку ефективність при оцінці ресурсу промислового обладнання. Таким чином, притаманні недоліки методів в оцінці працездатності конструкцій і їх залишкового ресурсу показують, що в теперішній час важливе значення приймають розрахункові методи з використанням критеріїв тріщиностійкості, чутливих до зміни структури металу в процесі тривалої експлуатації, особливо в корозійно-активних технологічних середовищах при знакозмінних динамічних навантаженнях. Крім того, в сучасних, складних для нафтогазової промисловості, умовах, коли оновлення фізично і морально застарілих основних фондів з причини фінансових ускладнень проходить в обмежених об'ємах, важливо зберегти і подовжити термін служби промислового обладнання, в тому числі трубопроводів, шляхом збільшення міжремонтного циклу. Тому розробка і використання в нормативно-регламентуючій документації сучасних критеріїв тріщиностійкості з урахуванням сірчано-водневої деградації металу дозволять більш точно спрогнозувати залишковий ресурс трубої сталі тривалої експлуатації.

Слід відмітити, що більшість авторів [1-3,5,10,11,13,20] досліджували сталі, які чи не були взагалі в експлуатації, чи не довгий період часу, а тому складно прогнозувати поведінку сталей в процесі тривалого терміну експлуатації ($\geq 10-30$ років) в агресивному робочому середовищі, яке вміщує сірководень, оксиди, різні розчини кислот та лугів. В літературі відсутні відомості детального дослідження механізмів крихкості і руйнування металів нафтогазового призначення із залученням високоточного лабораторного обладнання і сучасних зарубіжних методик (наприклад, Специфікацію Міжнародної асоціації корозійників – NACE). В цілому, аналіз літературних джерел, а також практичні дані свідчать про те, що існуючі науково-технічні і технологічні розробки стосовно забезпечення надійної корозійно-механічної стійкості і довговічності нафтогазопроводів та інших оболонкових металоконструкцій відповідального призначення і підвідомчих БНІП України в значній частині знаходять протиріччя і невизначеність; відсутні кількісно обґрунтовані рекомендації практичного застосування з метою забезпечення корозійно-механічної стійкості трубопроводів, працюючих в технологічно-агресивних середовищах при знакозмінних температурно-барометричних умовах і навантаженнях; виникла необхідність системного вивчення причин, умов і механізмів корозійно-механічних ушкоджень тривало експлуатованого обладнання, що дозволить значно підвищити експлуатаційну надійність промислового обладнання.

Таким чином, результати виконання цієї роботи є актуальними як для нафтогазової, так і для декількох суміжних галузей (наприклад, металургійної, хімічної, гірничої), а також мають суттєву науково-практичну значимість і цінність.

Метою даної роботи є лабораторно-експериментальні дослідження корозійно-механічних властивостей конструкційних сталей тривалої експлуатації в хімічно-агресивних технологічних середовищах нафтогазової промисловості.

Криві корозійної тривалої втомності зразків трубопроводів з різними термінами експлуатації (від 0 до 25 років) проводили в модельному корозійному середовищі NACE згідно

методики, детально викладеної в роботах [1,13]. В процесі експериментів досліджували корозійно-механічну втомність (тривалу міцність) металу на зразках, вирізаних з різних марок трубних сталей, які тривалий термін експлуатувалися в корозійних середовищах. Випробування зразків проводили в модельному середовищі NACE, яке представляло собою 5%-вий розчин NaCl, який вміщував 0.5% CH_3COOH , додатковим насиченням H_2S ; pH=3; $t=20\pm 2^\circ\text{C}$. Випробували зразки на установці гирьового типу УСМР-6 під осьово-симетричним навантаженням $\sigma_{0.2}^{\min}$ (в кожному експерименті використовували по 5 зразків).

При виборі методів дослідження, автори виходили з технічних умов, які встановлюють наступні вимоги до корозійно-механічної стійкості: для СКРН час до руйнування дослідницьких зразків не повинен бути менше 480 год при $P=0.8 \cdot \sigma_{0.2}^{\min}$, де $\sigma_{0.2}^{\min}$ - мінімально допустиме значення межі текучості [8,9]. Випробували циліндричні зразки діаметром 6.4 мм (робоча частина довжиною 25.4 мм).

Крім того, трубні зразки досліджували при підвищених навантаженнях і визначали рівні порогові (критичні) напруження $\sigma_{\text{tssc}}^{480}$ (threshold sulfide stress charaking) на базі випробувань, рівній 480 год, що має важливе значення для прогнозу оцінки ресурсу матеріалу. Так, коли трубна сталь якоїсь марки не задовольняє умовам [31], то досліджували її спротив СКРН по стандарту [8,9] і визначали порогові напруження σ_{ssc} , щоб можна було порівняти якість сталей різних марок і заводів, які випускають труби. Умови випробувань за цим стандартом наступні: тривалість випробувань 720 год в 5%-вому розчині $\text{NaCl}+\text{CH}_3\text{COOH}$, у насиченому сірководнем (H_2S); pH-3; $t=20\pm 2^\circ\text{C}$.

Параметри $\sigma_{\text{tssc}}^{480}$ і σ_{ssc} визначали із залежностей $\sigma_i - \lg t$ (σ_i – початкове навантаження; t – термін до розвантаження, год), при яких зразки не руйнуються на прийнятій базі випробувань.

Слід відмітити, що не стандартизованим, але в той же час загальноприйнятим критерієм придатності сталі до експлуатації в середовищі, яке містить сірководень, є співвідношення $\sigma_{\text{пор}} / \sigma_{0.2}$ (σ_T). Коли це співвідношення перевищує значення 0.8, то матеріал вважається придатним до використання.

В механіці руйнування металоконструкцій для оцінки в'язкості металу широко використовують параметр критичної інтенсивності напружень, який характеризує спротив металу розкриттю і розповсюдженню тріщин. Порогове (критичне) значення його позначають при випробуванні в корозійних середовищах величиною K_{ssc} , МПа·м^{1/2}. Втомні тріщини в зразках вирощували за допомогою гідропульсатора ЦДМпу-10 (Німеччина) при частоті навантаження 10-15 Гц і коефіцієнту асиметрії циклу $r=0.1-0.2$. Випробування по визначенню параметра K_i проводили на установці УМЕ-10 за стандартною методикою, викладеною в роботі [14], як на повітрі, так і в корозійному розчині з H_2S (методика NASE).

Матеріали досліджень – трубні сталі, характеристики яких наведені в табл.1 і 2.

В табл.3 зернистість сталі визначали за ГОСТ5639-69 чи FSME112-74, а вуглецевий еквівалент за формулою: $C_{\text{екв}} = C + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Cu} + \text{Ni})/15$.

Результати експериментальних досліджень зразків трубних сталей з різними термінами експлуатації наведені на рис .1 - 3.

Таблиця 1

Марки сталей та їх призначення

Марка сталі	Призначення	Термообробка
10 20 20K 09Г2С 17Г1С ВСт3сп	Металоконструкції машинобудівельної, нафтогазової, металургійної, хімічної, аграрної, комунальної та інших галузей промисловості	Нормалізація

Таблиця 2

Хімічний склад сталей

Марка сталі	Вміст елементів, %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
10	0.12	0.30	0.55	0.035	0.035	0.15	0.10	0.10
20	0.20	0.30	0.55	0.035	0.035	0.15	0.10	0.10
20К	0.22	0.35	0.65	0.3	0.03	0.12	0.12	0.10
09Г2С	1.12	0.37	1.80	0.025	0.025	0.08	0.05	-
17Г1С	0.19	0.60	1.21	0.03	0.03	-	0.30	0.30
ВСт3сп	0.12	0.27	0.40	0.04	0.04	-	-	-

Таблиця 3

Механічні характеристики сталей

Марка сталі	Механічні характеристики				С _{екв} , %	Зернистість
	σ_B , МПа	σ_T , МПа	ψ , %	δ , %		
10	360	220	52	24	0.32	7-8
20	485	287	56	27	0.33	7-8
20К	310	310	55	21	0.36	7-8
09Г2С	497	289	46	23	0.441	$\geq 7-8$
17Г1С	515	362	43	24	0.430	$\geq 7-8$
ВСт3сп	360	210	42	25	0.34	$\geq 6-7$

Встановлено, що зразки всіх сталей витримали повний цикл випробувань, зокрема ні один із п'яти зразків кожної серії не зруйнувався на протязі 480 год. В той же час аналіз кривих корозійної втомності дозволив зробити наступні висновки: 1)сталі марок 10, 20, 20К і ВСт3сп слабо чинять спротив тривалому знакозмінному навантаженню, зокрема після 10-15 років експлуатації межа тривалої міцності досягає напруження (150-220МПа), нижчого межі текучості для цих сталей (230-260МПа), причому порогові (критичні) значення напруження $\sigma_{пор}$ дорівнюють 125-160МПа. В той же час сталі 09Г2С і 17Г1С відповідають вимогам стандарту NACE (Standard MR-01-75-96), зокрема значення $\sigma_{пор}$ дорівнюють 250-262МПа. Результати розрахунку співвідношення $\sigma_{пор}/\sigma_T(\sigma_{0.2})$ для всіх марок сталей, які піддавалися експериментальним дослідженням, наведені в табл.4. Аналіз даних табл.4 показує, що співвідношення $\sigma_{пор}/\sigma_T(\sigma_{0.2})$ рівно 0.86 (сталь 09Г2С) і 0.89 (сталь 17Г1С), тобто ці дві марки сталей відповідають вимогам технічних умов NACE, а тому можуть бути рекомендовані для використання при виготовленні труб, які призначені для експлуатації в хімічно-агресивних середовищах, які містять сірководень; 2)на базі отриманих експериментальних результатів побудована діаграма схильності до сірководневого розтріскування не експлуатованих сталей марок: 10; 20; 20К; 09Г2С; 17Г1С; ВСт3сп. Заштрихована область – сталі з високою корозійною стійкістю проти СКРН.

Як показують результати аналізу залежності K_I - t для сталей з різними термінами експлуатації при випробуванні на повітрі (1; 2; 3) і в розчині NACE (1'; 2'; 3'), сірководневе середовище NACE більш ніж в 2.5-3.5 рази знижує границю втомності зразків сталей марок 10, 20, 20К і ВСт3сп та в 1.5-2 рази для сталей 09Г2С і 17Г1С. Так, після 10 і 25 років експлуатації в корозійно-агресивному середовищі NACE умовна границя втомності для сталі марки 09Г2С складає відповідно 82 і 95 МПа·м^{1/2}, а для сталі 17Г1С – 87 і 105 МПа·м^{1/2}. Аналогічна тенденція спостерігається і для сталей марок 10, 20, 20К і ВСт3сп, зокрема значення умовного порогового коефіцієнта інтенсивності напружень K_{ssc} (МПа·м^{1/2}) відповідно дорівнюють 23/80 (10 років), 5/65 (25 років); 30/85 (10 років), 10/75 (25 років); 35/80 (10 років), 22/70 (25 років); 15/62 (10 років), 5/50 (25 років). Слід зауважити, що тут в знаменнику наведені результати випробувань на повітрі, в чисельнику – в корозійно-активному розчині.

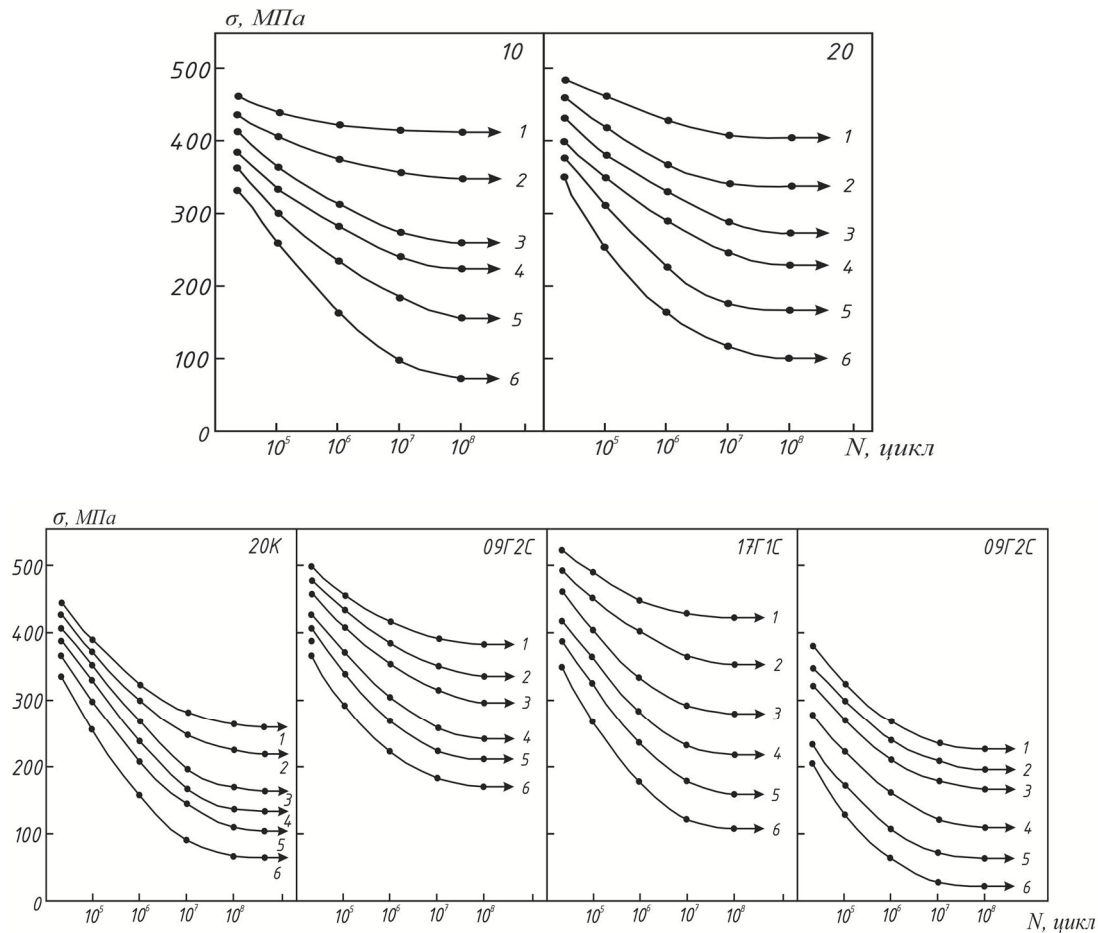


Рис. 1. Криві корозійної тривалості зразків трубопроводів з різними термінами експлуатації : 1 – 0 років; 2 – 5 років; 3 – 10 років; 4 – 15 років; 5 – 20 років; 6 – 25 років. Модельне корозійне середовище NACE

Таблиця 4

Порогові напруження і співвідношення $\sigma_{\text{пор}}/\sigma_T(\sigma_{0.2})$ сталей

Марка сталі	Характеристика клас	$\sigma_{\text{пор}}$ МПа	$\sigma_{\text{пор}}/\sigma_T(\sigma_{0.2})$
10	феритний	150	0.68
20	феритний	145	0.51
20К	феритний	160	0.66
09Г2С	перлітний	250	0.86
17Г1С	перлітний	262	0.89
ВСтЗсп	феритний	125	0.56

Порівняння зміряних значень K_{SSC} для досліджених сталей з результатами робіт [29, 30], отриманими для конструкційних низьколегованих сталей з нікелем і хромонікелевих сталей різних класів, показало, що без нікелеві сталі марок 08ХМЧА, 06Х1, 09Г2С і 17Г1С менш чутливі до сульфідного корозійного розтріскування (порівняння проводили для подібних по класу і механічним характеристикам нікельвмісних сталей). Прикладом можуть служити корпусні сорбітотвердіючі сталі, зокрема сталь 10ХН5МФ має $\sigma_{\text{пор}}=145\text{МПа}$, $\sigma_{\text{пор}}/\sigma_{0.2}=0.31$ і $K_{\text{SSC}}=30\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ (в розчині без H_2S коефіцієнт $K_{\text{SSC}}=102\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) – рис.3. Аналогічну закономірність відмічають і інші автори [10,11,28].

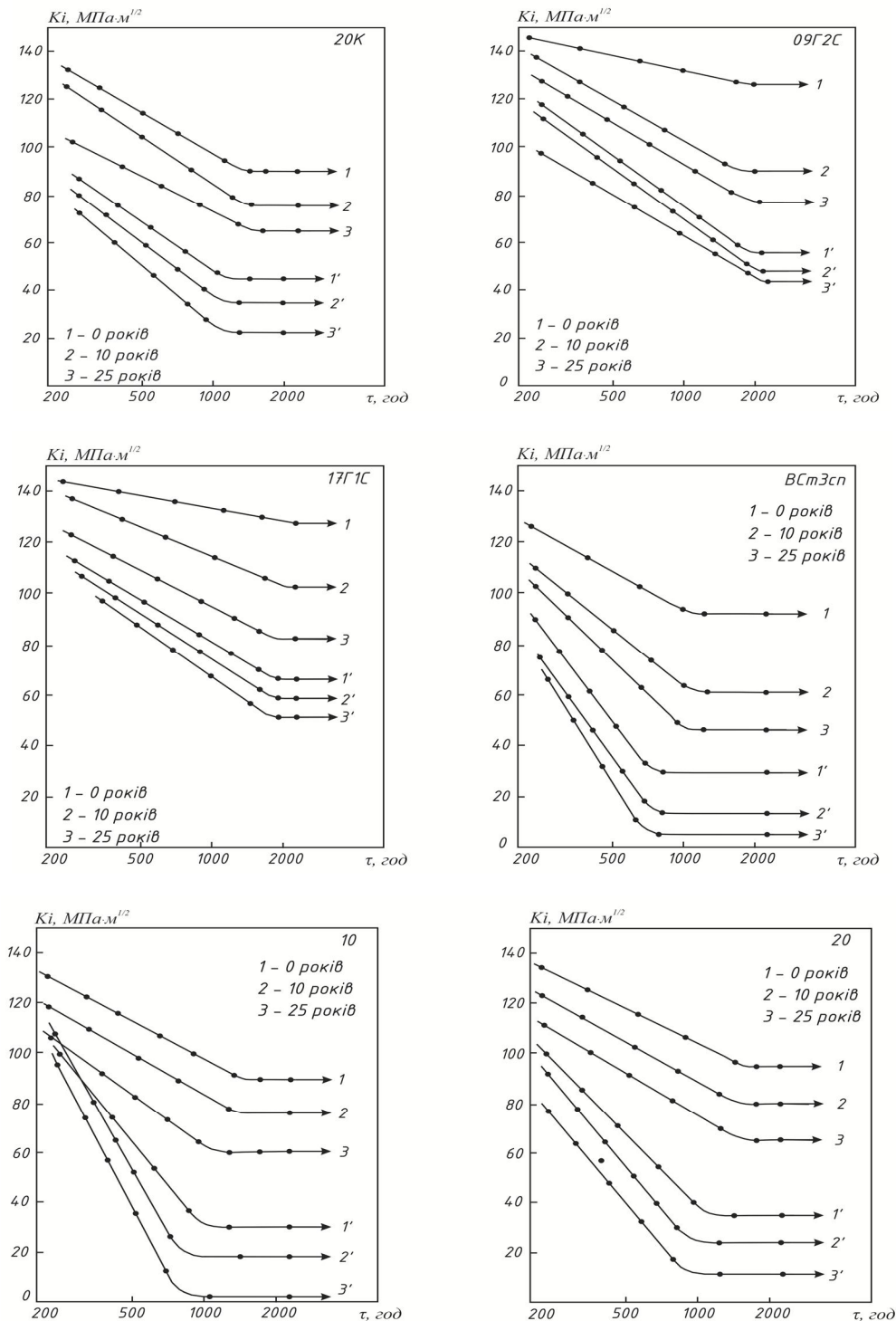


Рис. 2. Залежність $K_i - \tau$ для сталей з різними термінами експлуатації при випробуванні на повітрі (1; 2; 3) і в розчині NACE (1'; 2'; 3')

Результати дослідження кінетики локальних (точкових) корозійних ушкоджень стінки труби при випробуванні в корозійно-агресивному середовищі (методика NACE) наведені на рис.4. Відомо, що швидкість локальної корозії нафтогазопроводів оцінюють за втратами металу по товщині стінки труби, яка виражається залежністю $\Delta m = k \cdot \tau^{1/n}$, яка в логарифмічних координатах перетворюється в пряму лінію, тоді екстраполяція прямої дозволяє прогнозувати витрати металу стінки труби на протязі заданого часу і визначати експлуатаційний термін служби трубопровода.

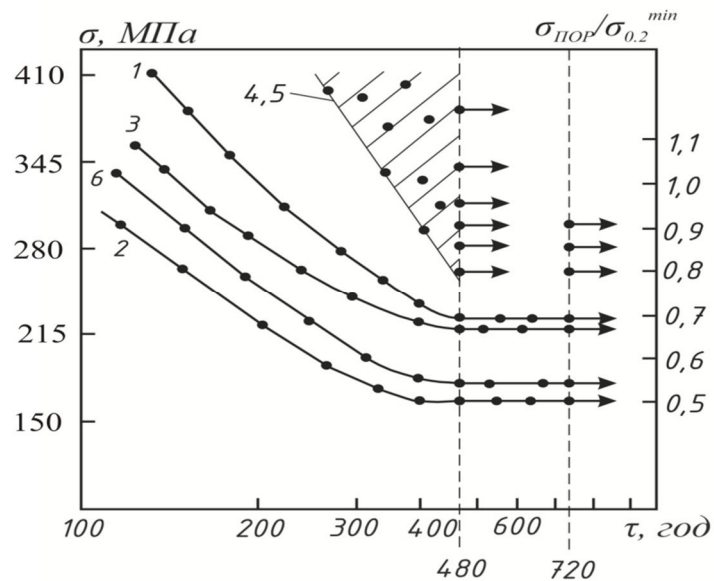


Рис. 3. Схильність до сірководневого розтріскування не експлуатованих сталей марок: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 20К; 4 – 09Г2С; 5 – 17Г1С; 6 – ВСтЗсп. Заштрихована область – сталі з високою корозійною стійкістю проти СКРН

Нахил прямої до осі абсцис $\lg t$ визначає значення коефіцієнта n . В умовах експерименту $n = 3$, тобто втрати маси металу виражаються законом кубічного кореня, що може свідчити про контроль корозійного розчину металу дифузійним процесом в шару продуктів корозії. Як показав аналіз кінетичної залежності корозійних втрат металу дослідницьких зразків, вирізаних з металу різних марок і призначення, у всіх умовах випробувань спостерігалось уповільнення корозійного ушкодження з терміном часу, що може бути виражено ступеневою залежністю $\Delta m = k \cdot \tau^{1/n}$, де Δm – втрата маси зразку, г; τ – термін експозиції, сутки; k – константа. На рис.4 наведені кінетичні залежності корозійних ушкоджень локального характеру зразків труб серії сталей (шість марок), які приводять до найменших і найбільших корозійних втрат. Це дозволяє своєчасно застосовувати технічні і конструкторсько-технологічні заходи для підвищення безаварійної працездатності конструкційних сталей трубопроводів.

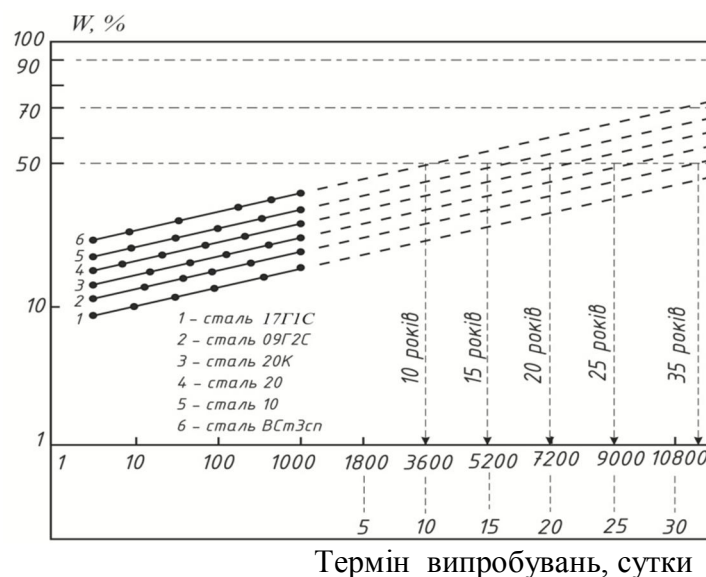


Рис. 4. Кінетика корозійних ушкоджень стінки труби при випробуванні в корозійно-агресивному середовищі (Методика NACE)

Металографічні дослідження зрізів сталей 10, 20, 20К і ВСтЗсп показали на утворення тріщин уздовж текстури сталей, спричинених водневою колонією, і які виходять на поверхню зразків (рис.5,а). Металографічні дослідження проводили із застосуванням растрового електронного мікроскопа моделі GSM-35 CF (фірма “Джеол”, Японія). Тріщини СКРН розвиваються перпендикулярно напрямку утворення текстури метала і навантаженню (рис.5,б).

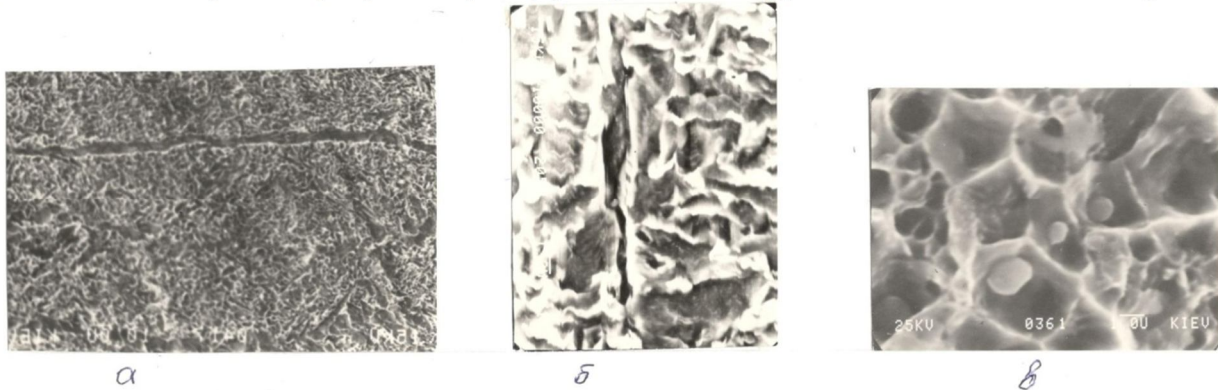


Рис. 5. Тріщина ВІР (а), тріщина СКРН (б) і неметалеві включення (сульфіди і оксисульфід), які є осередками зародження тріщин (в) при випробуванні зразків сталі. Позначення: а – х540, б – х2000, в – х3000.

Вважається [28], що основною причиною СКРН трубних сталей досліджених типів, які характеризуються високими в'язко-пластичними властивостями і низькою твердістю ($HRC \leq 22$), може бути підвищений вміст сірки і фосфору або локальне утворення голчатих структур мартенситно-бейнітного виду.

Слід звернути увагу на те, що наші дослідження не виявили утворення голчатих структур в досліджених зразках метала. Однак, було встановлено, що сталі марок 10, 20, 20К і ВСтЗсп містять занадто велику кількість сірки (0.030-0.035%) і фосфору (0.032-0.040%), що могло спричинити утворення сульфідних та інших неметалевих включень, які, як правило, служать осередком зародження корозійних тріщин (рис.5, в). Стосовно причин і механізмів СКРН окремих марок сталей потрібно проводити додаткові дослідження.

Висновки. Експериментальні дослідження дозволили встановити причини та обґрунтувати механізми знеміцнення металу зі збільшенням терміну експлуатації (від 0 до 25 років), що приводить до його деградації, особливо при довготривалій експлуатації в корозійних середовищах. Розроблений метод прогнозування залишкового робочого (безаварійного) ресурсу, який дає можливість цілеспрямовано регулювати експлуатаційним їх станом. Це дозволяє своєчасно застосовувати технічні і конструкторсько-технологічні заходи для підвищення працездатності таких конструкцій (підвідомчих Технадзору України).

Отримані численні та різноманітні результати експериментальних випробувань металевих зразків різного призначення надають можливість створення бази для порівняльного аналізу сталей за багатьма параметрами тріщиностійкості, що стане надійним підґрунтям для науково-практичного обґрунтування еквівалентної заміни одних марок сталей на інші з урахуванням технологічних режимів, умов експлуатації, систем силового навантаження, корозійних середовищ та інш.

Література

1. Усталостная и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов // О.Н.Романив, С.Я.Ярема, Г.Н.Никифорчин и др. Механика разрушения и прочность материалов/ Справ. пособие в 4- томах; Под ред. В.В.Панасюка; Т.4. – Киев: Наукова думка.- 1990;
- 2.Дмитрах И.М., Сиротюк А.М., Грабовский Р.С. К оценке допускаемой глубины трещиноподобных дефектов в трубопроводах энергетических станций// Физ.-хим. механика материалов. -2001.-№5.-С.69-74.
- 3.Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения. – М.: Машиностроение.- 1981.-272с

4. Надежность нефтегазопромысловых систем// Макаренко В.Д. - Челябинск: Изд-во ЦНТИ. -2006.-826с.
- 5.Золотаревский В.С. Механические свойства металлов.-2-е изд.- М.: Металлургия. - 1983.-350с.
- 6.Методические указания: Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении. –М.: ВНИИМаши.-1979.-100с.
- 7.Мешков Ю.Я. Физические основы прочности стальных конструкций. –Киев: Наукова думка. -1981.-238с.
- 8.NACE. StandardMR-01-75-96. Standard Material Requirements. Sulfide Stress Cracking Resistant Metallic Materials Oilfield Equipment //NACE. Houston. P.O. BOX 218340.-1996.-30p.
- 9.NACE. Standard TM0177-90. Standard Test Method Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking in H₂S Environments//NACE.-Houston. P.O. Box 218340.-1990.-22p.
- 10.Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Партон В.З. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие. – Киев: Наукова думка. -1988.-488с.
- 11.Радкевич О.І., П'ясецький О.С., Василенко І.І. Корозійно-механічна тривкість трубної сталі в сірководневому середовищі// Фіз.-хім. механіка матеріалів. -2000.-№3.-С.93-97
- 12.Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами//О.Чапля, О.Радкевич, О.П'ясецький, Я.Спектор/ Машинознавство.-1999.-№8.-С.52-56
- 13.Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.:Недра. -1982.-382с.
- 14.Методика испытания на стойкость против сероводородного коррозионного растрескивания. МСКРН-01-85. – Изд-во ГКНТ СССР. – 1985.-22с.
- 15.Гумеров Ф.Г., Ямалеев И.М., Журавлев Г.В. и др. Трещиностойкость металла труб нефтепроводов. – М.:ООО"Недра-Бизнесцентр". -2001.-231с.
- 16.Trucbon M.R., Crolet J.I. Experimental limits of sourer service for tubular steels //SSC Symposium. - Saint-Cloud.- 21.- 2013p.
17. Stardisco J.B, Pitts R.E. Corrosion of Iron in H₂S-CO₂-H₂O System , Mechanism of Sulfide Film Formation and Kinetics of Corrosion // Corrosion .-2014.-№9.-P.245-253.
18. Vynnykov Yu.L., Makarenko V.D., Kravetz I.A., Mynenko I.S. Doslidzhennya prychyn znyzhennya micznosti truboprovodiv TECz. – Problemy tertya ta znoshuvannya. – 2019. – №1(82).- 63-68.
19. Makarenko V.D., Chebotar I.M., Petrenko O.O., Nogina A.M. Doslidzhennya mexanichnyx vlastyvostej trub oxolodzhuyuchykh system dovgotryvaloi ekspluatatsii v shyrokomu intervali minusovykh temperatur v umovah brodynogo vyrobnyctva. – Problemy tertya ta znoshuvannya. - 2019. –№1(82). - 69-79.
20. Panasyuk V.V. (1990) Fracture mechanics and strength of materials. Kiev. Naukova Dumka.
21. Makarenko V.D. (2006) Reliability of oil and gas production systems. Chelyabinsk. TSNTI.
22. Migel R., Ruge V. (2011) Hydrogen as alloy element. Schw. u schn. 7. 250-252.
23. Marvin C.W. (2012) Determining the strength of Corroded Pipe. Materials propection and Perfolmance. 11. 38-40.
24. Vasilkovsky O., Rivard A. (2013)The effect of hydrogen sulfide in gruide oil on fatigue ckack growth in pipe line steel. Corrosion. V.38. 1. 19-22.
25. Makarenko V.D., Muravjev K.A., Kalyanov A.I. (2006) Special features of manual ars welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Westem Siberia. Welding International. 10 (5). 64-71.
26. Makarenko V.D., Shatilo S.P., Astafev V.I. (1998). Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. Welding Internationa. 12. 34-39.
27. Makarenko V.D., Shatilo S.P. (1999) Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines. Welding International. 12. 56-61.
- 28.Василенко І.І., Мелехов Р.К. Коррозионное растрескивание сталей. –Киев: Наукова думка. -1977.-265с
- 29.Бриду Д., Лафранс М., Прову И. Разработка новых сортов стали с повышенными характеристиками для транспорта кислого газа и нефти.- Нефтегаз-Франция.-М.: Юзичор Асье. -1986.-19с
- 30.Похмурский В.И., Мелехов Р.К., Круцан Г.М. Коррозионно-механическое разрушение сварных конструкций. –Киев: Наукова думка. -1995.-261с
- 31.Specification tengui Oil and Gas Plant. Process Plant. Lurgi ode: 65102-00-MAL-TENGIZ II. Specification №SPC-62900-XP-007.