

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИЧНОГО ПІДХОДУ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОГО РОЗТРИСКУВАННЯ ВІД НАПРУЖЕННЯ З УРАХУВАННЯМ КОМПЛЕКСНОГО ВПЛИВУ ЧИННИКІВ

Л.І. Ниркова, С.Л. Мельничук, С.О. Осадчук, А.О. Рибаків, Н.О. Дараганова

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України;
03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11, e-mail: lnirkova@gmail.com

Розроблено методичний підхід до дослідження схильності трубної сталі до корозійного розтріскування від напруження в лабораторних умовах, який полягає в моделюванні комплексного впливу зовнішніх (випробувальний розчин та наведений потенціал) та внутрішніх (циклічні навантаження, наявність локального осередку корозії) чинників. Проведено порівняльні дослідження схильності трубної сталі до стрес-корозійного розтріскування в умовах комплексного впливу зовнішніх та внутрішніх чинників та встановлено, що при інших однакових умовах найбільш інтенсивно прискорюють стрес-корозійне розтріскування наявність локального осередку корозії та катодний потенціал.

Ключові слова: трубна сталь, корозійне розтріскування від напруження, деформація з повільною швидкістю.

Разработан методический подход к исследованию склонности трубной стали к коррозионному растрескиванию под напряжением в лабораторных условиях, состоящий в моделировании комплексного влияния внешних (испытательный раствор и приложенный потенциал) и внутренних факторов (циклические нагрузки и наличие локального очага коррозии). Проведены сравнительные исследования склонности трубной стали к стресс-коррозионному растрескиванию в зависимости от комбинации внешних и внутренних факторов и установлено, что наиболее интенсивно влияют на стресс-коррозионное растрескивание наличие локального очага коррозии и катодный потенциал.

Ключевые слова: трубная сталь, коррозионное растрескивание под напряжением, деформация с медленной скоростью.

The methodological approach to the research of the pipe steel susceptibility to corrosion cracking under stress has been developed in the laboratory environment. This approach consists in the model analysis of complex effect of external (experimental solution and applied potential) and internal factors (periodic load and presence of local corrosion spot). Comparative studies of the pipe steel susceptibility to corrosion cracking under stress, depending on the combination of external and internal factors have been conducted. It has been established that the presence of local corrosion spot and the cathodic potential have the main impact on the corrosion cracking under stress.

Key words: pipe steel, corrosion cracking under stress, slow rate deformation.

Вступ

Аварії, що відбуваються на магістральних нафто-і газопроводах, істотно впливають на екологію навколишнього середовища. Тому вивчення механізмів явищ, які призводять до аварій, має важливе наукове і практичне значення. Аналізуючи досвід експлуатації магістральних трубопроводів, можна виділити три найбільш значущі причини їх руйнування: корозійний знос, втома, корозійне розтріскування від напруження (КРН). Всі інші явища менш вагомі, але можуть прискорювати руйнування за тим чи іншим механізмом. У світі з проблемою КРН вперше зіткнулися у 60-ті роки, в нашій країні – у 80-ті роки минулого сторіччя. Здавалося, що за цей час, враховуючи важливість та масштабність явища, вже мали вирішити цю проблему, але дотепер її актуальність тільки зростає, а кінцеве рішення відсувається на невизначений час. Механізм перебігу стрес-корозійних процесів відрізняється від інших видів корозії і руйнування, оскільки на них впливає сукупність багатьох чинників. Це обумовлює необхідність більш детального дослідження явища корозійного розтріскування від

напруження, що дозволить розроблювати ефективні заходи для його контролю та запобігання.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

На цей час проблема КРН для ряду газотранспортних підприємств ПАТ «НАК «Нафтогаз України» стала однією з найгостріших у зв'язку аваріями. КРН – це руйнування трубопроводів при одночасному тривалому впливі специфічного зовнішнього середовища та напруження, що розтягне [1]. КРН розвивається із зовнішньої, катодно-захищеної поверхні труби, під покривом, що відшарувалося, при впливі ґрунтового електроліту, який містить солі вугільної кислоти (карбонати і бікарбонати), зовнішніх і внутрішніх механічних напружень, які виникають при експлуатації газопроводів. Таке середовище пасивує поверхню труби і уповільнює загальну корозію сталі. У місцях пошкодження пасивуючої плівки виникають ділянки локальної корозії [1]. У цей час основною ознакою КРН вважають наявність на зовнішній поверхні труб колоній поздовжніх тріщин. Особливий інтерес для розуміння процесу КРН

представляють ненаскрізні тріщини, оскільки вони характеризують стан металу в процесі руйнування. Ще одним джерелом візуальної інформації про ознаки КРН є характер зламу. Остаточному руйнуванню труби при КРН обов'язково передують стадія стабільного росту тріщини, тому на зламі видно, щонайменше, дві зони: стабільного росту тріщини й катастрофічного руйнування (долому). Є дані про те, що властивості металу на ділянках утворення та поширення стрес-корозійних тріщин не відрізняються від його властивостей на інших ділянках та відповідає вимогам технічних умов на труби і тріщини не мають жорсткої прив'язки до поверхневих концентраторів напружень [2]. Крім того, тріщини зароджуються на ділянках металевої поверхні, що не містять дефектів, та розташовані на відстані від монтажного зварного шву. Більшість аварій через КРН відбувається на відстані до 30 км від компресорної станції за ходом газу. Метал труби в цій зоні, крім контакту з ґрунтовим електролітом на ділянках з пошкодженим захисним покритвом, піддається додатковому впливу підвищеної температури – до (25-35) °С, що прискорює електрохімічні процеси. Вібрації, за певних умов, також можуть сприяти зародженню стрес-корозійних тріщин.

За сучасними уявленнями існує два основних механізми КРН – механізм локального анодного розчинення [3] і водневого руйнування [4], які взаємопов'язані, але якісно різні, тому обґрунтовуючи провідну роль одного з механізмів, слід мати на увазі можливість перебігу КРН іншим [5]. Для трубної сталі типу Х70 за катодної поляризації при рН, близьких до нейтрального, існує критичний діапазон потенціалів, (наприклад, від -730 мВ до -920 мВ (відносно стандартного каломельного електроду)), в якому реакція анодного розчинення може перебігати за катодної поляризації: якщо поляризаційний потенціал знаходиться в цій області, КРН перебігає за сумісного впливу обох механізмів [5].

Чинниками КРН, яким приділяють увагу сучасні вітчизняні та закордонні дослідники, є: рН середовища [6-7], стан захисного покриття [8-9], рівень потенціалу катодного захисту [10-11], особливості мікроструктури [12-13], металургійний чинник [14], нерівноважні термодинамічні процеси під дією терморушійних сил [15-16] тощо.

Спираючись на вищенаведене, сформульовано мету роботи, яка полягала у розробленні методичного підходу до дослідження процесу КРН з урахуванням впливу найвагоміших зовнішніх та внутрішніх чинників в лабораторних умовах.

Матеріали і методи досліджень

Дослідження проводили на зразках трубної сталі типу Х70, виготовлених з труби діаметром 1420 мм з товщиною стінки 15,7 мм такого хімічного складу (у ваг. %): 0,095 С, 1,39 Мп, 0,255 Si, 0,005 S, 0,017 Р, 0,032 Al, 0,04 Ni,

0,03 Мо, 0,004 Ti, 0,05 V, 0,027 Nb, 0,04 Ст. Механічні характеристики сталі: тимчасовий опір розриву $\sigma_b = 588$ МПа, границя текучості $\sigma_T = 441$ МПа.

В роботі використовували розчини на основі модельного ґрунтового електроліту (МГЕ):
- розчин № 1 – МГЕ складу, г/л: 0,037 КСІ + 0,559 NaHCO₃ + 0,008 CaCl₂ + 0,089г/л MgSO₄, рН 8,0 [17];

- розчин № 2 – МГЕ +0,5 г/л CN₂H₄O, рН 8,6;

- розчин № 3 – МГЕ +10,8 г/л KSCN, рН 9,0;

- розчин № 4 – МГЕ + буферний розчин у співвідношенні 9:1, рН 8,2. Буферний розчин готували на дистильованій воді згідно з [18] змішуванням в потрібному співвідношенні гідрофосфатів натрію і калію – ¹/₁₅М Na₂HPO₄·2H₂O та ¹/₁₅М KH₂PO₄.

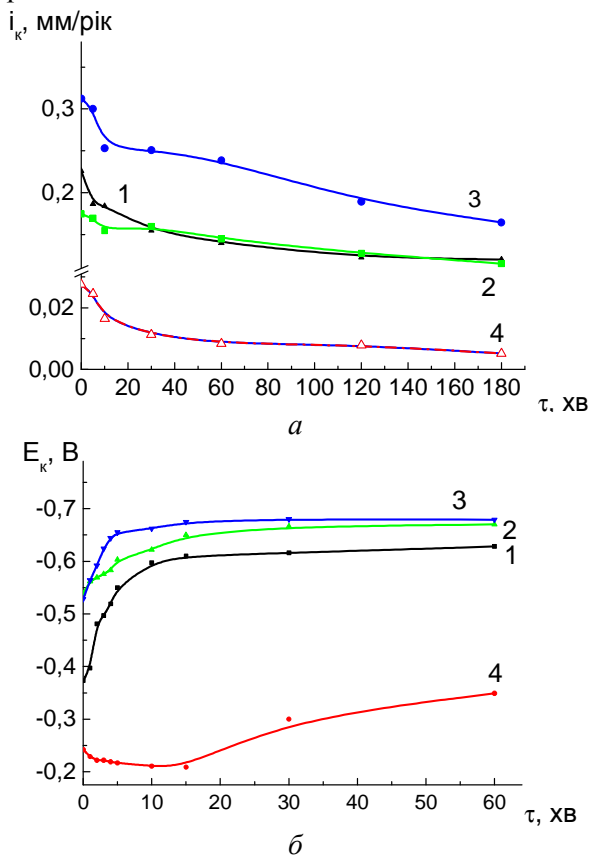
Швидкість корозії сталі в досліджуваних розчинах визначали методом поляризаційного опору на двоелектродних давачах за допомогою корозиметра універсального УИСК-101. Потенціали корозії трубної сталі вимірювали в вищенаведених розчинах відносно хлорсрібно-го електроду порівняння за допомогою потенціостату ПИ-50 впродовж 1 год. Анодні та катодні поляризаційні криві знімали в потенціодинамічному режимі за триелектродною схемою зі швидкістю розгортки потенціалу 5×10^{-4} В/с. Робочим електродом слугував зразок трубної сталі, допоміжним – платиновий. Дослідження проводили методом деформації з повільною швидкістю 10^{-6} м/с плоских зразків у корозійному середовищі за наведеного потенціалу на розривній машині АИМА-5-1. Напружено-деформований стан контролювали за показниками: подовження, час до руйнування, площа перерізу зразка в місці руйнування, відносно звужування, ступінь стійкості зразка до КРН – К (безрозмірна величина), що дорівнює відношенню відносно звужування у повітрі та у розчині. Оцінювання схильності до КРН проводили за зовнішнім виглядом зразків після руйнування: вважали, що труба сталь схильна до КРН, якщо характер руйнування – крихкий або крихкий з в'язким доломом, і коефіцієнт ступені схильності до КРН більше 1,6.

Результати досліджень та їх обговорення

Як відомо, для газопроводів України характерним є стрес-корозійне розтріскування при рН, близьких до нейтральних. Нейтральні середовища проявляють низьку агресивність. Є припущення, що вони містять речовини, які, при контакті з поверхнею сталі приводять до утворення локальних осередків корозії. Тому було приділено увагу дослідженню впливу різних компонентів середовища на корозійні, електрохімічні та корозійно-механічні властивості трубної сталі.

Швидкість корозії трубної сталі в МГЕ становила близько 0,12 мм/рік. Додавання до нього тіомочевини, SCN₂H₄O, яка, як відомо, має інгібіторні властивості, в перші 20 хв спри-

яло незначному зниженню швидкості корозії трубної сталі, але з часом значення швидкості корозії в обох середовищах майже співпали (рис. 1, а криві 1 і 2). Додавання в МГЕ роданід-іонів, призвело до підвищенню швидкості корозії протягом всього часу досліджень та стабілізуванню її біля значення 0,16 мм/рік, рис. 1, а, крива 3.



1 – МГЕ, 2 – МГЕ + 0,5CN₂H₄O, 3 – МГЕ + 10,8 г/л KSCN, 4 – МГЕ + буферний розчин у співвідношенні 9:1

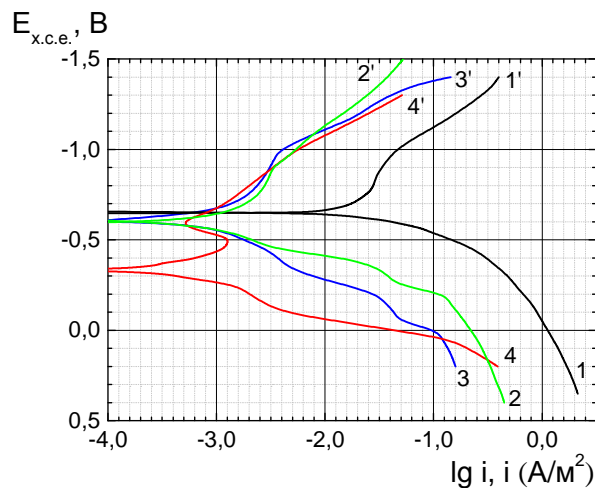
Рисунок 1 – Швидкість корозії (а) і потенціал корозії (б) трубної сталі типу Х70 в розчинах

Відповідно до моделі локального анодного розчинення [3], локальні корозійні процеси, які згодом приводять до розвитку стрес-корозійних дефектів, починаються у тонкій плівці вологи, що утворилася під захисним покривом під час його відшарування від поверхні труби. Відповідно до літературних даних та власного досвіду, в цьому місці струм катодного захисту не досягав поверхні металу, тому рН в ньому не змінювалося. Стабілізування рН забезпечували додаванням фосфатного буферного розчину до МГЕ. Дослідним шляхом було встановлено, що при змішуванні МГЕ з буферним розчином рН після випробувань не змінювалось. Швидкість корозії при цьому знизилася майже на порядок порівняно з МГЕ, рис. 1, а, крива 4.

Потенціал корозії в МГЕ становив близько -0,628 В. При додаванні тіомочевини та роданід-іонів спостерігали зміщення потенціалу корозії в негативний бік порівняно з МГЕ, що вказувало на деяке активування корозійних

процесів на поверхні, рис. 1, б, криві 2 та 3. В розчині МГЕ, в якому стабілізували значення рН за допомогою буферного розчину, спостерігали зміщення потенціалу корозії в область більш позитивних значень, рис. 1, б, крива 4.

Аналізуючи поляризаційні криві трубної сталі в досліджуваних розчинах (рис. 2), слід відзначити, що додавання іонів HPO₄²⁻, H₂PO₄⁻, SCN⁻ та NH₂⁻ сприяло зменшенню граничного струму відновлення кисню майже на 2 порядки, табл. 1. У розчинах №№ 1-3 виділення водню починалося за потенціалу близько -0,95 В (х.с.е.), у розчині № 4 – за потенціалу близько -0,85 В.



1 – МГЕ, 2 – МГЕ + 0,5CN₂H₄O, 3 – МГЕ + 10,8 г/л KSCN, 4 – МГЕ + буферний розчин у співвідношенні 9:1

Рисунок 2 – Анодні (1-4) та катодні (1'-4') поляризаційні криві трубної сталі типу Х70 в розчинах

На анодній кривій область активного анодного розчинення у всіх розчинах була дуже короткою від 110 мВ до 120 мВ. Як видно з табл. 1, тільки у розчині № 4 тафелевський нахил дорівнював 0,059 В, що підтверджувало, що анодний процес перебігав з дифузійним контролем. У МГЕ тафелевський нахил збільшувався до 0,079 В, а для розчинів №№ 2 та 3 – до 0,127 В та 0,129 В, відповідно, що вказувало на гальмування анодного процесу, можливо, обумовлене утрудненням відведення продуктів корозії від сталеві поверхні.

Корозійно-механічні властивості трубної сталі досліджували у вищезазначених розчинах за потенціалу корозії та потенціалу катодного захисту, який обирали таким, щоб він знаходився в діапазоні значень поляризаційного захисного потенціалу згідно з ДСТУ 4219, а саме -1,0 В. Отримані результати наведено в табл. 2 та на рис. 3.

Для зразків трубної сталі за потенціалу корозії у всіх середовищах характер руйнування був в'язким та схильність до КРН становила менше 1,6, як наведено на рис. 3, з. За потенціалу -1,0 В схильність до КРН проявилася у

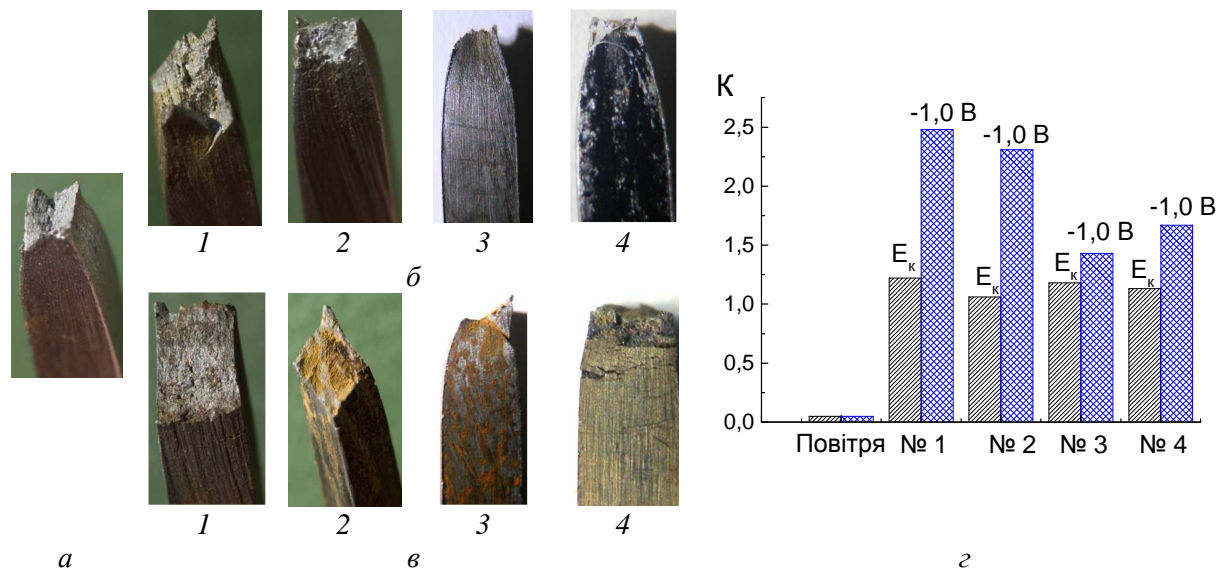
Таблиця 1 – Електрохімічні характеристики досліджуваних середовищ

Розчин	i_k , мм/рік	E_k , В	Поляризаційні характеристики		
			b_a , В	$i_{d_{O_2}}$, А/м ²	E_{H_2} , В
№1	0,112	-0,628	0,079	0,025	-0,95
№2	0,116	-0,670	0,127	0,0025	-0,95
№3	0,164	-0,679	0,129	0,0026	-0,95
№4	0,005	-0,349	0,059	0,0018	-0,85

Примітка. Застосовані позначення: i_k – миттєва швидкість корозії, E_k – потенціал корозії, b_a – тафелівський нахил анодної поляризаційної кривої, $i_{d_{O_2}}$ – граничний струм відновлення кисню, E_{H_2} – потенціал початку виділення водню

Таблиця 2 – Корозійно-механічні властивості зразків трубної сталі типу Х70 за різних умов

Умови випробувань	τ , год	ΔL , м	S , мм ²	Ψ , %	K	Характер руйнування
Повітря	19	0,00621	3,01	67	-	В'язкий
Розчин №1, E_k	21	0,00632	4,08	55	1,22	В'язкий
Розчин №1, -1,0 В	16,5	0,00457	6,59	27	2,48	Крихкий з в'язким доломом
Розчин №2, E_k	20,5	0,00620	3,35	63	1,06	В'язкий
Розчин №2, -1,0 В	16	0,00449	6,35	29	2,31	Крихкий з в'язким доломом
Розчин №3, E_k	16	0,00466	3,73	59	1,13	В'язкий
Розчин №3, -1,0 В	17	0,00473	4,80	47	1,43	В'язкий
Розчин №4, E_k	20	0,00600	3,87	57	1,18	В'язкий
Розчин №4, -1,0 В	14	0,00412	5,37	40	1,67	Крихкий з в'язким доломом

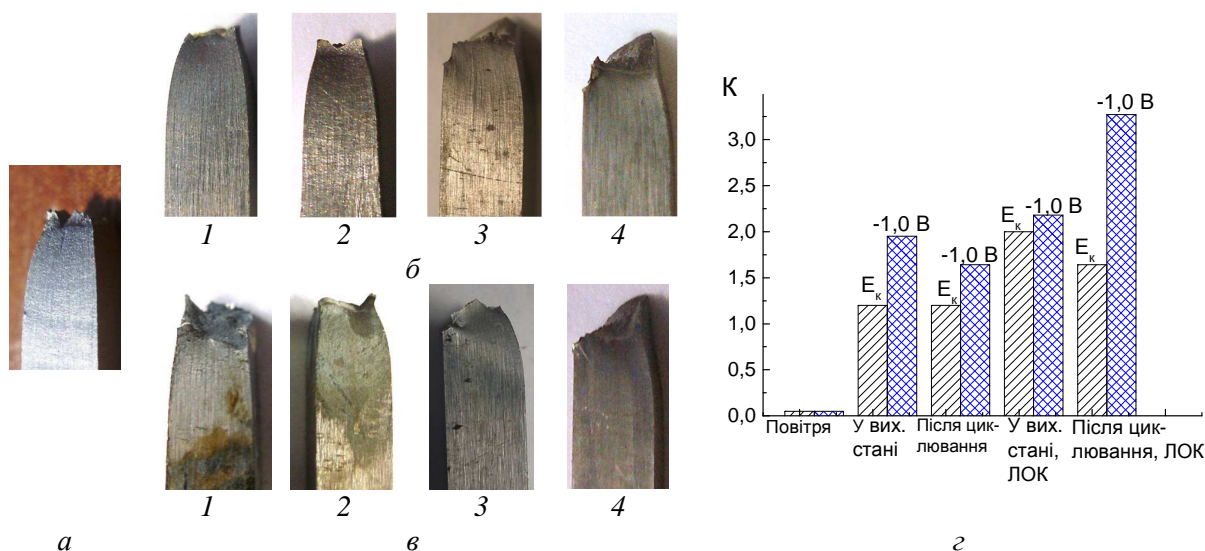


1 – МГЕ; 2 – МГЕ + 0,5CN₂H₄O, 3 – МГЕ + 10,8 г/л KSCN, 4 – МГЕ + буферний розчин у співвідношенні 9:1 та її схильність до КРН за цих умов (z)
 Рисунок 3 – Фото зламу зразків трубної сталі типу Х70 після корозійних випробувань у повітрі (а) та корозійно-механічних випробувань за потенціалу корозії (б) та потенціалу -1,0 В (в) у досліджуваних розчинах

розчинах №1, №2 та №4, де спостерігалось крихке руйнування з в'язким доломом. При руйнуванні зразка у розчині №4 за потенціалу -1,0 В навколо місця зламу утворилися вторинні тріщини, рис. 3, а, що характерно для стрес-корозійних тріщин. Крім того, завдяки буферним властивостям в процесі досліджень обране середовище не змінює рН та не викликає коро-

зії зразка, тому подальші дослідження проводили саме в цьому розчині.

Продовжуючи моделювання умов, що сприяють стрес-корозійному розтріскуванню, проведено аналіз внутрішніх чинників. При експлуатації впродовж тривалого часу газопровід зазнає циклічної дії напружень, що розтягують, тому для відтворення впливу внутрішніх



1 – зразок у вихідному стані, 2 – після циклювання, 3 – у вихідному стані з ЛОК, 4 – після циклювання з ЛОК та ступінь схильності до КРН (z) за цих умов
Рисунок 4 – Фото зламу зразків трубної сталі типу X70 після випробувань у повітрі (а) і корозійно-механічних випробувань за потенціалу корозії (б) та потенціалу -1,0 В (в) у розчині МГЕ + буферний розчин у співвідношенні 9:1

Таблиця 3 – Корозійно-механічні властивості зразків трубної сталі типу X70 у повітрі та у розчині за комбінованого впливу стрес-корозійних чинників

Умови випробувань	τ , год	ΔL , м	S , мм ²	Ψ , %	K	Характер руйнування
Повітря	21	0,00573	2,52	72	-	В'язкий
$E=E_k$						
У вихідному стані	19	0,00548	3,58	60	1,2	В'язкий
Після циклювання	19	0,00548	3,38	62	1,2	В'язкий
У вихідному стані, ЛОК	9	0,00233	5,70	36	1,95	Крихкий з в'язким доломом
Після циклювання, ЛОК	9	0,00355	5,03	44	1,64	Крихкий з в'язким доломом
$E= -1,0\text{ V}$						
У вихідному стані	18,5	0,0041	5,66	37	1,95	Крихкий з в'язким доломом
Після циклювання	13	0,00375	5,02	44	1,64	Крихкий з в'язким доломом
У вихідному стані, ЛОК	4,5	0,00103	6,02	33	2,18	Крихкий з в'язким доломом
Після циклювання, ЛОК	3	0,00052	7,00	22	3,27	Крихкий з в'язким доломом

чинників зразки піддавали попередньому циклюванню в діапазоні граничних напружень від $0,4\sigma_t$ до $0,8\sigma_t$ з частотою 10 Гц протягом 10^5 циклів. Імовірно, що ініціювання первинних корозійних тріщин відбувається від локальних осередків корозії (далі – ЛОК), тому для відтворення механізму локального анодного розчинення в лабораторних умовах на зразку моделювали такий осередок корозії. ЛОК наносили на одну з поверхонь зразка механічним способом, він мав V-подібну форму і глибину від 0,25 мм до 0,3 мм. Дослідження проводили за різних потенціалів. Досліджували такі зразки: у вихідному стані, після попереднього циклювання, у вихідному стані з модельним ЛОК, після попереднього циклювання з ЛОК. На основі аналізу зовнішніх та внутрішніх стрес-корозійних чинників, вибрано найвагоміші, при моделюванні яких проводили подальші дослідження схильності до КРН.

Нижче наведено результати корозійно-механічних випробувань зразків трубної сталі типу X70 у повітрі та у розчині №4 за різних потенціалів. З аналізу отриманих даних видно, що за потенціалу корозії у розчині №4 руйнування зразків у вихідному стані та після циклювання відбувалося в'язко (рис. 4, б, фото 1 і 2), аналогічно руйнуванню у повітрі (рис. 4, а): подовження зразків становило близько 0,00548 м, площа поперечного перерізу, відповідно – 3,59 та 3,38 мм² при вихідному перерізі зразків 9 мм², відносно звужування – 60 % та 62 %, відповідно. При цьому ступінь схильності до КРН дорівнювала близько 1,2 для обох зразків (табл. 3). Навколо місця руйнування видно потоншення, яке властиве для в'язкого руйнування (рис. 4, б, фото 1 і 2).

Наявність ЛОК сприяла зміні характеру руйнування – воно стало крихким з в'язким доломом, в'язкого потоншення в області руйну-

вання не спостерігалось (рис. 4, б, фото 3 та 4). При цьому подовження зразків зменшилося до 0,00233 м та 0,00355 м, відповідно, а відносне звужування – 36 % та 44 %.

Катодна поляризація за потенціалу -1,0 В суттєво вплинула на характер руйнування зразків у вихідному стані та після циклювання (рис. 4, б, фото 2 та 3). Подовження зразків зменшилося близько на 25 % і 32 %, відповідно, відносне звужування зменшилося до 37 % та 44 %, табл. 3. При цьому ступінь схильності до КРН збільшилася суттєво та дорівнювала 1,95 для зразка у вихідному стані та 1,64 для зразка після циклювання (табл. 3). На фотографіях видно крихкий злам, який супроводжувався утворенням вторинних тріщин, які є ознакою стрес-корозійного руйнування (рис. 4, в, фото 1 та 2).

Моделювання ЛОК сприяло тому, що частка крихкої складової у руйнуванні збільшилася, як видно з рис. 4, в (фото 3 та 4). При цьому подовження зразків зменшилося в 4...7 разів порівняно із зразками без ЛОК, відповідно до 0,00103 м та 0,00052 м, а відносне звужування – до 33% та 22%.

Встановлено, що при інших однакових умовах найбільш інтенсивно прискорюють процес КРН наявність ЛОК та наведення потенціалу катодного захисту.

Висновки

Розроблено методичний підхід до дослідження схильності трубної сталі до корозійного розтріскування від напруження в лабораторних умовах, який полягає в моделюванні комплексного впливу зовнішніх (випробувальний розчин та наведений потенціал) та внутрішніх (циклічні навантаження, наявність локального осередку корозії) чинників.

Обґрунтовано вибір корозійно-активного середовища для досліджень схильності трубної сталі до корозійного розтріскування від напруження, яким є модельний ґрунтовий електроліт з натрієво-калієвим фосфатним буферним розчином. Водневий показник рН цього середовища, дорівнює 8,2 та практично не змінюється протягом всього часу досліджень за потенціалів, які знаходяться в межах нормованих значень захисних потенціалів.

Проведено порівняльні дослідження схильності трубної сталі до стрес-корозійного розтріскування в лабораторних умовах залежно від комбінації зовнішніх та внутрішніх чинників. Встановлено, що при інших однакових умовах найбільш інтенсивно прискорюють процес КРН наявність ЛОК та наведення потенціалу катодного захисту.

Література

1 Антонов В.Г. Коррозионное растрескивание под напряжением труб магистральных газопроводов: атлас / В.Г. Антонов, А.Б. Арабей, В.Н. Воронин, И.А. Долгов, М.М. Кантор, З. Кношински, Ю.П. Сурков; отв. ред.

А.Б. Арабей, З. Кношински. – М.: Наука, 2006. – 105 с.

2 Савеня А.А. Пути снижения стресс-коррозионной повреждаемости действующих газопроводов / А.А. Савеня, С.Н. Савеня // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Политематическая сер. – 2007. – Вып. 2 (3). – www.vestnik.vgasu.ru

3 Чвірук В.П. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ / В.П. Чвірук, С.Г. Поляков, Ю.С. Герасименко. – Київ: Академперіодика, 2007. – 332 с.

4 Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання. – Науково-технічний посібник / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; під. ред. В.В. Панасюка. У 3-х т. – Т.1. Основи оцінювання деградації трубопроводів. – Івано-Франківськ: вид. Івано-Франківського нац. техн. ун-ту нафти і газа. – 2011. – 457 с.

5 Mechanistic aspect of near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines under cathodic polarization / Z.Y. Liu, X.G. Li, Y.F. Cheng // Corrosion Science. – 2012. – V. 55, Issue. 2. – 2012. – P. 54-60.

6 Stress corrosion cracking behavior of X70 pipe steel in an acidic soil environment / Z.Y. Liu, X.G. Li, C.W. Du, G.L. Zhai and Y.F. Cheng // Corrosion Science. – V. 50, Issue 8. – 2008. – P. 2251-2257.

7 Parkins R.N., Blanchard Jr., B.S. Delanty B.S. Transgranular stress corrosion cracking of high-pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH // Corrosion. – 1994. – V. 50, No. 5. – P. 394-408.

8 A.Q. Fu, X. Tang and Y.F. Cheng. Characterization of corrosion of X70 pipeline steel in thin electrolyte layer under disbanded coating by scanning Kelvin probe // Corrosion Science. – V. 51, Issue 1. – 2009. – P. 186-190.

9 Глазов Н.П. Влияние состояния изоляции трубопроводов на скорость их коррозионного разрушения / Глазов Н.П., Глазов Н.Н., Башаев М.А. // Трубопроводный транспорт (теория и практика). – 2009. – № 1. – С.47-49.

10 Хижняков В.И. Предупреждение выделения водорода при выборе потенциала катодной защиты подземных стальных трубопроводов / В.И. Хижняков // Коррозия: материалы, защита. – 2009. – № 9. – С. 7-10.

11 Мазель А.Г. Водород – фактор коррозийного растрескивания трубопроводов / А.Г. Мазель // Строительство трубопроводов. – 1992. – № 9. – С.23-26.

12 Role of microstructures on stress corrosion cracking of pipeline steels in carbonate-bicarbonate solution / H. Asahi, T. Kushida, M. Kimura, H. Fukai, S. Okano // Corrosion. – 1999. – V. 55, № 7. – P. 644-652.

13 Microstructure dependence of stress corrosion cracking initiation in X-65 pipeline steel exposed to a near-neutral pH soil environment / R. Chu, W. Chen, S.-H. Wang, F. King, T.R. Jack, R.R. Fessler // Corrosion. – 2004. – V. 60, № 3. – P.275-283.

14 Kentish P. Stress corrosion cracking of gas pipelines – Effect of surface roughness,

orientations and flattening // Corrosion Science. – 2007. – V. 49, Issue 6. – P. 2521-2533.

15 Гаррис Н. Активизация коррозионных процессов на магистральных газопроводах большого диаметра при импульсном изменении температуры / Н. Гаррис, Г. Аскарлов // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. – 2006. – Вып. 1. – <http://www.ogbus.ru>

16 Гаррис Н.А. Изменение теплофизических характеристик грунта вокруг газопровода большого диаметра как причина активизации коррозионных процессов / Н.А. Гаррис, И.Г. Исмагилов, А.Н. Бахтегареева // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. – 2010. – Вып. 1. – <http://www.ogbus.ru>

17 Yunovich M., Xia Z., Szklarska-Smialowska Z. Factors influencing stress corrosion cracking of carbon steel in diluted bicarbonate environments // Corrosion. – 1998. – Vol. 54, № 2. – P.155-161.

18. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии / Ю.Ю. Лурье. – М.: Химия. – 1979. – 480 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії

17.05.17

*Рекомендована до друку
професором Грудзом В.Я.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Андрійком О.О.
(НТУУ «КПІ», м. Київ)*