

ОЦІНЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ СТАЛЕЙ МАГІСТРАЛЬНИХ НАФТО- І ГАЗОПРОВОДІВ

¹Д.Ю.Петрина, ²О.І.Звірко, ²М.І.Греділь

¹ ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 43024
e-mail: public@nuing.edu.ua

² Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України,
79601, м. Львів, МСП, вул. Наукова, 5; e-mail: petrushchak@ipm.lviv.ua

Проведен комплекс исследований механических и электрохимических свойств низколегированных сталей магистральных нефте- и газопроводов.

Установлено, что продолжительная эксплуатация магистральных нефте- и газопроводов сопровождается деградацией металла в объеме стенки трубы. Показано снижение характеристик сопротивления хрупкому разрушению всех исследованных сталей, что проявилось в падении ударной вязкости, трещиностойкости, относительного сужения. Выявлена электрохимическая активация стали в результате длительной эксплуатации, в частности, падение поляризационного сопротивления, рост плотности тока коррозии. Полученные результаты указывают на более сильную деградацию нижних участков эксплуатируемых труб, сравнительно с верхними, что является следствием агрессивного действия транспортируемой среды.

Більшість магістральних нафто- і газопроводів України експлуатують вже тривалий час. Постійно зростає їх відсоток із відпрацьованим нормативним терміном. Виявлені численні корозійні пошкодження поверхонь труб і резервуарів загострюють проблему їх подальшої надійної та безпечної експлуатації. Останнім часом для магістральних нафто- та газопроводів як об'єктів тривалої експлуатації набула актуальності проблема корозійно-водневої деградації металу. Специфіка роботи цих тривало експлуатованих об'єктів зумовлена сумісною дією експлуатаційних напружень та корозивного середовища (залишкової води чи газового конденсату для нафто- і газопроводів відповідно). На їх довговічність та надійність суттєво впливають умови експлуатації: коливання тиску та температури, інтенсивність корозійних процесів та формування різного роду дефектів [1].

Особливістю експлуатаційної деградації трубопроводів є те, що з часом погіршуються властивості не лише приповерхневих шарів металу, які безпосередньо контактують з корозивним середовищем, але й металу в об'ємі стінки труби [2]. Такі процеси можуть протікати лише за наявності водню, абсорбованого металом в результаті протікання корозійних процесів в агресивних середовищах.

Особливої гостроти експлуатаційна деградація сталей, з яких виготовляють труби, набуває з огляду зниження їх опору крихкому, в тому числі корозійно-механічному руйнуванню, а також посилення чутливості до водневого окрихчення. Ці явища були встановлені, напри-

The complex of researches of mechanical and electrochemical properties of low-alloyed steels of oil-and-gas main pipelines is conducted.

It is set, that long-term exploitation of oil-and-gas main pipelines is accompanied by in bulk metal degradation of pipe wall. The reduction of characteristics of brittle fracture resistance of all investigated steels, that was become apparent in falling of impact resistance, crack growth resistance, reduction of area, is shown. The electrochemical activating of steel as a result of the long-term exploitation is discovered, in particular, reducing of polarization resistance, increasing of corrosion current density. Received results point to prepotent degradation of the lower fragments of the exploited pipes, comparatively with the upper ones, as a result of transported environment aggressive action.

клад, в роботах [3-5]. Тому при оцінюванні технічного стану магістральних трубопроводів необхідно врахувати можливість зміну фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей конструкційних сталей внаслідок їх експлуатаційної деградації.

Вивчення цих питань є актуальною науково-технічною проблемою як для формування теорії корозії та корозійно-водневої деградації сталі у нафто-водневому середовищах, так і для вирішення практичних завдань протикорозійного захисту.

Мета роботи – дослідити зміну корозійних, електрохімічних, механічних, корозійно-механічних характеристик сталей магістральних трубопроводів після їх тривалої експлуатації, порівняти чутливість різних характеристик до експлуатаційної деградації.

Матеріали та методики випробувань

Експерименти виконані на сталі типу 10ГС труб імпортного виробництва магістрального нафтопроводу після 28 років експлуатації (діаметр 1020 мм, товщина стінки 16 мм); сталі 17Г1С магістрального газопроводу після 30 та 40 років експлуатації (зразки вирізували з труби діаметром 1020 мм і товщиною стінки 12 мм), та сталі X52 експлуатованого впродовж 30 років магістрального газопроводу (маркування труб X52-12 і X52-10 відповідно товщині стінки досліджуваної труби 12 та 10 мм). Для порівняння досліджували кожну сталь у стані поставки. В цьому випадку зразки вирізували з тру-

би резервного запасу. В експлуатованих трубних сталях 10ГС та X52 окремо виділяли верхній та нижній фрагменти труб.

Швидкість корозії сталей визначали гравіметричним методом. Кінетику корозійного процесу досліджували потенціодинамічним методом, використовуючи стандартну трьохелектродну комірку з допоміжним платиновим та хлоридсрібним електродом порівняння. Застосовували потенціостати ІРС-Pro та ПИ-50-1 з відповідним програмним забезпеченням. Експерименти проводили у водогінній воді, розчині NaCl, модельних розчинах залишкових вод (для нафтопроводу) та газового конденсату (для газопроводів). За результатами випроб визначали базові електрохімічні характеристики – потенціал корозії E , густину струму корозії j , поляризаційний опір R_p та коефіцієнти Тафеля b_k і b_a .

Стандартні механічні характеристики міцності та пластичності сталі визначали розтягом (швидкість переміщення захоплювача 0,5 мм/хв) циліндричних зразків діаметром робочої частини 4 мм та довжиною 25 мм. Ударну в'язкість KCV встановлювати на зразках Шарпі із V-подібним вирізом стандартної (10 мм) і нестандартної (5 мм) товщини. Через високу пластичність статичну тріщиностійкість досліджуваних сталей визначали методом J-інтеграла. Випробовували згином призматичні зразки 80×12×2,5 мм з боковою втомною тріщиною. Приріст тріщини визначали методом часткового розвантаження зразка за зміною його податливості. Кількісною характеристикою тріщиностійкості слугував параметр $J_{0,2}$ – J-інтеграл за приросту тріщини 0,2 мм [6]. Завдяки малій товщині (5 мм для випроб на ударну в'язкість і 2,5 мм для J-інтеграла) зразки вирізали з металу ближче до внутрішньої чи зовнішньої поверхонь труби, що дало можливість оцінити градієнт механічних властивостей по її товщині.

Схильність металу до водневого окрихчення оцінювали за зміною відносного звуження циліндричних зразків ψ^H , навантажених за швидкості переміщення захвата 0,5 мм/хв, після їх попереднього електролітичного наводнювання за густини струму 10 мА/см² впродовж однієї години в електрохімічній комірці, яка охоплювала робочу частину зразків. Використовували водний розчин H₂SO₄ (рН 0) з добавкою 2 г/л тіосечовини як стимулятора наводнювання.

Результати та обговорення

Структура досліджуваних трубних сталей складалась, крім зерен фериту і перліту, ще й витягнутих стрічкових включень сульфїту марганцю. Як гарячекатаним сталям їм властива текстурована структура, волокна якої орієнтовані в напрямі прокатки - твірної труби. Загалом мікроструктуру сталей у вихідному та експлуатованих станах можна вважати однаковою.

Електрохімічні та механічні характеристики сталей по різному чутливі до їх експлуатаційної деградації. Тому варто порівняти їх,

привівши їх до певного нормованого значення, яке б відображало відносну зміну показника за однакового ступеня деградації матеріалу. Тоді ці нормовані значення можна використовувати в якості показників ступеня деградації. У роботі за такі нормовані значення прийняли відношення

$$P_D / P_0,$$

де: P_D – величина певної характеристики деградованого матеріалу;

P_0 – величина цієї ж характеристики для вихідного матеріалу.

Це співвідношення використовували у випадку, коли абсолютні величини цієї характеристики зменшуються із ростом ступеня деградації матеріалу: ударна в'язкість, J-інтеграл, поляризаційний опір. У випадку, коли величини цієї характеристики збільшуються із ростом ступеня деградації матеріалу, використовували обернену величину такого відношення $(P_D / P_0)^{-1}$: потенціал корозії, густина струму корозії, густину анодного струму за постійного потенціалу.

Експлуатація досліджуваних сталей впродовж 28-40 років суттєво вплинула на механічну поведінку матеріалу, на кривій розтягу (залежність напруження від переміщення захвату) появилася сходинка плинності, чіткіше виражена за тривалішої експлуатації. При цьому знижуються обидві характеристики міцності - границі міцності та плинності. Слід зазначити, що границя міцності змінюється сильніше за границю плинності. Це зменшує за час експлуатації різницю між цими показниками.

З результатів експерименту, приведених на рисунку 1 видно, що потенціал корозії сталі X52 мало чутливий до деградації. Чутливішими електрохімічними параметрами виявились поляризаційний опір та густина струму за сталого анодного потенціалу: внаслідок експлуатації вони знизились у 2-2,5 рази.

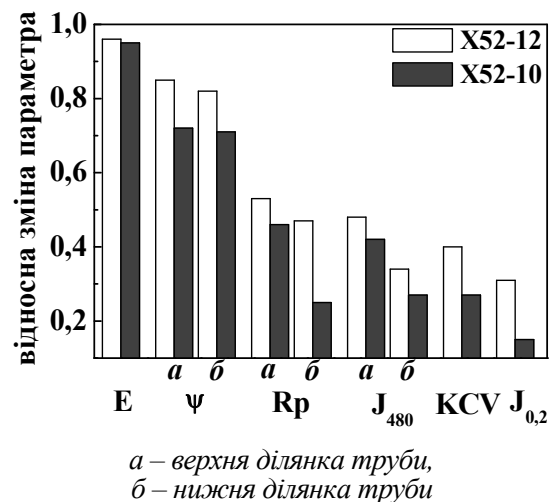


Рисунок 1 – Вплив тривалої експлуатації на характеристики сталі X52, віднесені до їх початкового значення

Суттєвих змін зазнали практично всі механічні властивості сталі X52. Відносно звуження як інтегральна характеристика пластичності

мало чутлива до експлуатаційних змін в металі. Найвищу чутливість виявив J-інтеграл, що характеризує опір матеріалу до поширення тріщин, які неминуче зароджуються і накопичуються в експлуатованому металі.

Слід відзначити відмінність у властивостях сталі верхньої і нижньої ділянок експлуатованих труб, що можна вважати ознакою деградації. З рисунка 1 видно, що ці зміни для різних характеристик сталі X52 можуть бути різної інтенсивності. Проте в цілому нижня ділянка труби деградує швидше внаслідок безпосереднього контакту з корозивним середовищем (конденсатом, залишковою водою) впродовж тривалої експлуатації.

Приведені експериментальні результати також свідчать, що характеристики зразків сталі X52, вирізаних з труб товщиною 10 мм більш чутливі до впливу тривалої експлуатації, ніж зразків, вирізаних з труб товщиною 12 мм.

Тривала експлуатація не впливає на потенціал корозії трубною сталі 17Г1С, проте погіршує її корозійну тривкість – поляризаційний опір зменшується практично пропорційно часу експлуатації (рис. 2). Враховуючи простоту вимірювання поляризаційного опору, цю характеристику можна використовувати не тільки для моніторингу корозійних процесів, але і для оцінювання деградації властивостей трубопроводу під час експлуатації. Це дає можливість розроблення електрохімічних експрес-методів оцінювання стану матеріалу тривало експлуатованих нафто- і газопроводів.

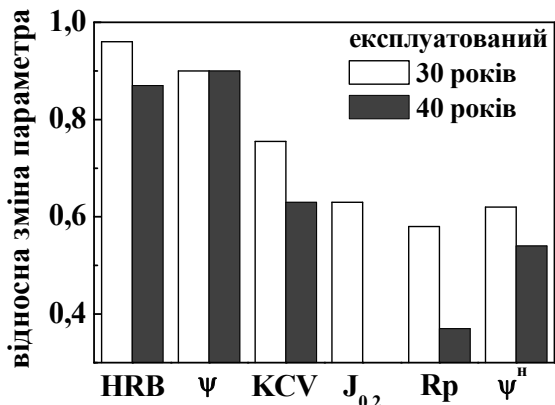


Рисунок 2 – Вплив тривалої експлуатації на характеристики сталі 17Г1С, віднесені до їх початкового значення

За зміною твердості та пластичності важко судити про деградацію сталі впродовж 30 років експлуатації. Відчутно твердість змінюється лише в наступні 10 років. В той же час параметр відносного звуження в даний період експлуатації трубопроводів залишається практично незмінним. Чітко виражена тенденція до пропорційного зниження впродовж періоду експлуатації ударної в'язкості та тріщиностійкості. Найбільш суттєве зниження за період тривалої експлуатації трубопроводів має величина поляризаційного опору R_p .

Потенціал корозії трубною сталі 10ГС практично не чутливий до її деградації (рис. 3). Чутливість густини струму корозії сталі набагато вища, ніж потенціалу корозії: густина струму корозії матеріалу нижньої ділянки труби вища, порівняно із вихідним станом, у 4 рази.

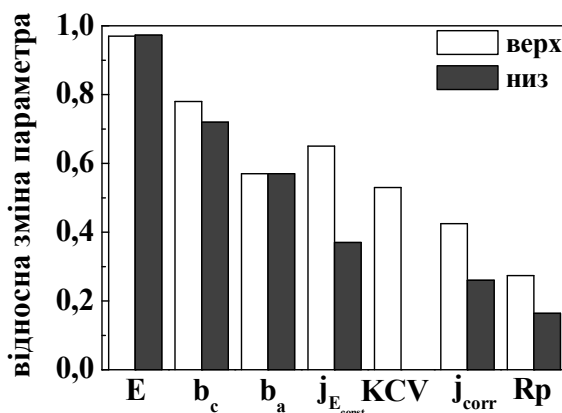


Рисунок 3 – Вплив тривалої експлуатації на характеристики сталі 10ГС, віднесені до їх початкового значення

Розчинення сталі 10ГС після 28 років експлуатації відбувається активніше порівняно із вихідним станом. Відповідно тафелівські ділянки катодної та анодної кривої для низу мають найменший нахил (найнижчі значення коефіцієнтів b_k та b_a), тобто корозійний процес на деградованій сталі протікає легше і з певною зміною механізму.

Найчутливішими до деградації сталі є густина струму корозії та поляризаційний опір. Внаслідок деградації матеріалу ці характеристики погіршуються в 3...4 рази.

Серед механічних властивостей сталі 10ГС досліджено ударну в'язкість за Шарпі (KCV). Величина ударної в'язкості експлуатованої сталі нижча майже вдвічі, порівняно з вихідним станом.

ВИСНОВКИ

Узагальнивши наведені дані, можна стверджувати, що тривала експлуатація магістральних нафто- і газопроводів супроводжується деградацією металу в об'ємі стінки труби. Для всіх досліджених експлуатованих сталей спостерігається зниження опору крихкому руйнуванню, що виявилось у падінні ударної в'язкості, тріщиностійкості, відносного звуження. Характеристики опору росту тріщини особливо чутливі до експлуатаційної деградації металу.

Електрохімічні характеристики, особливо поляризаційний опір, виявили достатньо високу чутливість до експлуатаційної деградації сталей, а це відкриває перспективи розроблення на їх основі електрохімічних експрес-методів оцінки стану тривало експлуатованого матеріалу.

Загалом деградація металу більше виражена для нижніх ділянок експлуатованих труб, що підтверджує негативний вплив на властивості матеріалу транспортованого середовища.

Перспективи подальшого дослідження

Література

Останнім часом причиною експлуатаційних пошкоджень нафто- і газопроводів все частіше стають зварні з'єднання. За сумісного тривалого впливу наводнювального середовища та механічних навантажень зварні з'єднання особливо схильні до крихкого руйнування. Сприяє цьому їх макро- і мікронеоднорідність за хімічним складом, структурою та механічними властивостями. Структурні мікрodefекти в зварних з'єднаннях стають енергетично вигідними пастками для водню, що потрапляє в метал як під час зварювальних робіт, так і з робочого середовища. Високоградієнтні поля залишкових напружень в них сприяють перерозподілу водню і роблять їх особливо чутливими до його впливу. Тому можна припустити, що деградація металу зварних з'єднань у наводнювальному середовищі протікатиме інтенсивніше порівняно з основним металом. Звідси дослідження структурних аспектів деградації за впливу наводнювального середовища та оцінювання їх впливу на механічні властивості та механізми руйнування металу зварних з'єднань є важливим завданням сучасного матеріалознавства як з наукової, так і з практичної точок зору. Це зумовлює проведення подальших досліджень з оцінюванням експлуатаційної деградації зварних з'єднань магістральних нафто- і газопроводів.

Відзначимо, аналіз науково-технічної літератури свідчить, що у розвинутих зарубіжних країнах для розв'язання проблеми продовження терміну служби та забезпечення надійної роботи магістральних трубопроводів вироблена скоординована технічна політика між структурами транспортування нафти та газу і структурами інспекції та екологічного нагляду [7].

В основу цієї політики покладене діагностування фактичного стану металу трубопроводів, який унаслідок тривалої експлуатації зазнає деградації в об'ємі стінки труби. В якості наукового інструментарію для цього зараз все ширшого застосування одержують сучасні методи механіки руйнування. Це пояснюється тим, що процеси руйнування трубопроводів під впливом одночасної дії механічних навантажень і корозійних середовищ є локалізованими процесами утворення та розвитку в сталі тріщиноподібних дефектів, які під час експлуатації можуть вирости до критичних розмірів. На сьогодні ці підходи одержали практичне застосування [8]. Однак, вони мають багато недоліків і потребують подальшого удосконалення [9]. Основним є те, що не існує єдиної скоординованої концепції зі створення відповідної нормативної бази та банку даних про вихідні характеристики тріщиностійкості трубних сталей, а також впорядкованого банку даних про зміну цих характеристик залежно від терміну та умов експлуатації трубопроводів.

1 Кузьменко Ю. Сучасні вимоги до надійності та безпеки магістральних трубопроводів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – Спец. вип. – № 4, т. 1. – С. 373-375.

2 Воднева деградація тривало експлуатованих сталей магістральних газопроводів / Цирульник О.Т., Никифорчин Г.М., Петрина Д.Ю. і ін. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2007. – № 5. – С. 97-104.

3 Прогнозирование коррозионно-механических разрушений трубопроводов // А.Г. Гареев, И.А. Иванов, И.Г. Абдуллин и др. – М.: ИРЦ Газпром, 1997. – 170 с.

4 Гутман Э.М., Амосов Б.В., Худяков М.А. Малоцикловая коррозионная усталость трубной стали при эксплуатации магистральных нефтепроводов // Строительство трубопроводов. – 1978. – № 4. – С. 27-29.

5 Krasowsky, A.Y., Dolgiy, A.A., Torop, V.M. Charpy testing to estimate pipeline steel degradation after 30 years of operation. Proc. "Charpy Centenary Conference", Poitiers. – 2001, Vol. 1. – P. 489-495.

6 Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness. ASTM E 1737.

7 Технічний та екологічний ризики при експлуатації магістральних трубопроводів / Я.М.Семчук, Г.М.Кривенко, Л.Т.Гораль, Р.М.Говдяк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – №1. – С. 68-70.

8 Розрахунки на міцність діючих магістральних трубопроводів з дефектами. Відомчі будівельні норми України. – Київ: Держнафтогазпром, 2000. – 56 с.

9 Оцінка тріщиностійкості магістральних трубопроводів за критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – №1. – С. 6-11.