

ЕКСПЛУАТАЦІЙНА ДЕГРАДАЦІЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАЛЕЙ ГАЗОПРОВІДІВ І ЇЇ ДІАГНОСТУВАННЯ

О.Т. Цирульник

Фізико-механічний інститут НАН України, 79601, Львів, віл. Наукова, 5, тел. (03422) 43024
e-mail: tsyru@ipm.lviv.ua

Тривала експлуатація магістральних трубопроводів зумовлює зміни механічних властивостей сталей “в об’ємі”, найістотніше – характеристик крихкого руйнування. Параметри тріщиностійкості особливо чутливі до експлуатаційної деградації сталей, а значний спад ударної в’язкості зумовлений зниженням складової поширення тріщини.

Ключові слова: магістральний трубопровід, тріщиностійкість, експлуатаційна деградація сталей.

Длительная эксплуатация магистральных трубопроводов обуславливает изменение механических свойств сталей “в объеме”, наиболее существенно – характеристик хрупкого разрушения. Параметры трещиностойкости особенно чувствительны к эксплуатационной деградации сталей, а значительный спад ударной вязкости обусловлен понижением составляющей распространения трещины.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, трещиностойкость, эксплуатационная деградация сталей.

Long-term service of transit pipelines causes a change of the mechanical “in-bulk” steel properties, the most essential for the characteristics of brittle fracture. The parameters of crack propagation are especially sensitive to in-service degradation of steels and the considerable decrease of impact strength is connected with a decrease of the crack growth component.

Keywords: transit pipelines, crack propagation, in-service degradation of steels.

Вступ

Діагностування стану конструкцій тривалої експлуатації за безпечністю їх експлуатації полягає, здебільшого, у виявленні та характеристикуванні різного виду дефектів. Водночас слід брати до уваги можливу деградацію фізико-механічних властивостей матеріалів, які визначають їх роботоздатність. Останнім часом цій проблемі приділяється особлива увага, оскільки значна частина конструкцій відповідального призначення у багатьох галузях промисловості та транспортуванні вже вичерпала свій плановий ресурс, який складає десятки років. До таких об’єктів відносяться і магістральні газопроводи України, термін експлуатації більшості з яких складає 30-40 років. Тож виникає проблема можливої втрати їх роботоздатності через старіння металу, локальну корозію, руйнування як з зовнішнього, так і внутрішнього боку труб [1]. Головним чинником корозії внутрішньої поверхні труб є водний конденсат, в якому акумулюються наявні в очищеному газі, навіть в незначній кількості, солі, органічні домішки, CO₂ та сполуки сульфур [2, 3]. Конденсат може стікати на дно труби [4], що робить цю її частину особливо корозійно уразливою, а з огляду на інтенсифікацію середовищем деградації властивостей металу в об’ємі стінки труби, слід брати до уваги і можливе її наводнювання як результат взаємодії системи „метал-середовище”.

Внаслідок зниження механічних властивостей тривало експлуатованого металу загострюється також проблема їх прогнозування методами неруйнівного контролю. Можна припустити, що зміна стану сталей магістральних трубопроводів у ході їх експлуатації спричи-

нить суттєві зміни електрохімічних показників взаємодії металу з спеціально підібраним електродом, що може лягти в основу неруйнівного методу контролю деградації механічних властивостей із використанням підходів електрохімії.

Матеріали і методики експериментів

Досліджували сталі 17Г1С заготовок, вирізнаних із труби запасу та експлуатованих впродовж 28-40 років, а також її зарубіжний аналог X52. Дві труби із сталі X52 експлуатувались 30 років і відповідно до товщини стінки труби - 10 і 12 мм позначені умовно як X52-10 і X52-12. Позначали *низ* та *верх* експлуатованої труби, а в деяких випадках зразки вирізали ближче до внутрішньої або зовнішньої її поверхні. Схема вирізання зразків зображена на рис. 1. Циліндричні зразки (діаметр і довжина робочої частини відповідно 4 і 25 мм) випробовували розтягом за швидкості деформування $\dot{\epsilon} = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ з метою визначення характеристик міцності і пластичності.

Визначали ударну в’язкість KCV на стандартних зразках типу Шарпі, які вирізали як вздовж, так і впоперек твірної труби, а надріз виконували з боку внутрішньої (1*), зовнішньої (2*) поверхні чи вздовж стінки (3*) труби (див. рис. 1). У деяких випадках ударну в’язкість розглядали за двома складовими: енергії зародження і поширення тріщини [5]. Методика передбачала запис діаграми “Навантаження – прогин зразка”, а поділу сумарної енергії руйнування на складові відповідав максимум на цій діаграмі. Експерименти проводили за кімнатної (20°C) та пониженої (-20°C) температури.

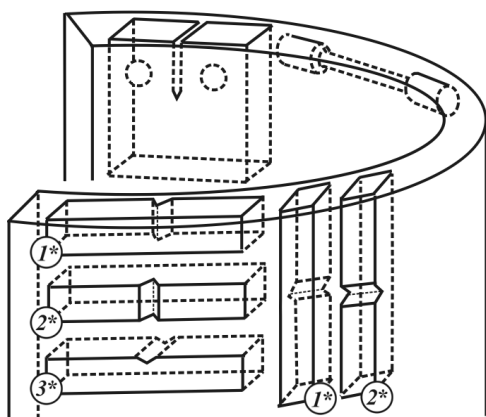


Рисунок 1 – Схема вирізання зразків з труби

Враховуючи високу пластичність досліджуваного металу, для його випробування на статичну тріщиностійкість використовували метод J -інтегралу [6], що полягав у навантаженні розтягом компактних зразків 0,5СТ товщиною 8 мм. Втомні тріщини від концентратора вирощували пульсуючим циклічним навантаженням згідно вимог [6]. Визначали параметри J_i і $J_{0,2}$, рівні J -інтегралу, що відповідають моменту виникнення і величини приросту тріщини 0,2 мм.

Результати випробувань та їх обговорення

Унаслідок тривалої експлуатації трубопроводів змінюються механічні властивості сталей. На кривих розтягу $\sigma - \epsilon$ з'явилися „полочки” плинності, більш виражені для тривалішої експлуатації, а коефіцієнт деформаційного зміцнення суттєво зріс. Спостерігається різке зниження межі плинності сталі 17Г1С та для обох сталей характеристики ψ . Проте вплив експлуатації на відносне видовження δ неоднозначний: для сталей X52-10 і 17Г1С – виявлено його підвищення. Твердість експлуатованих сталей нижча порівняно з початковим станом, при цьому нижнім ділянкам труби властивий сильніший ефект.

Сталям властиве суттєве зниження ударної в'язкості внаслідок експлуатації, більш виражене для шарів металу, розміщених ближче до внутрішньої поверхні труби, а також для зразків, вирізаних уперек твірної труби. Стосовно орієнтації надрізу, то у разі його виконання вздовж стінки труби (3*, див рис. 1), KCV найнижче. Зниження температури випробування незначно (на 15...20%) зменшило KCV сталі X52 порівняно з початковим станом, причому за рахунок опору поширення тріщини (рис. 2).

В той же час низькотемпературна ударна в'язкість експлуатованої сталі втричі менша за KCV сталі у вихідному стані, а складова поширення тріщини – у чотири рази.

Експлуатація труб призвела також до зменшення тріщиностійкості металу, особливо у місцях, розташованих ближче до внутрішньої поверхні. Це вказує на негативний вплив транспортованого середовища на опір поширенню тріщини в експлуатованому матеріалі.

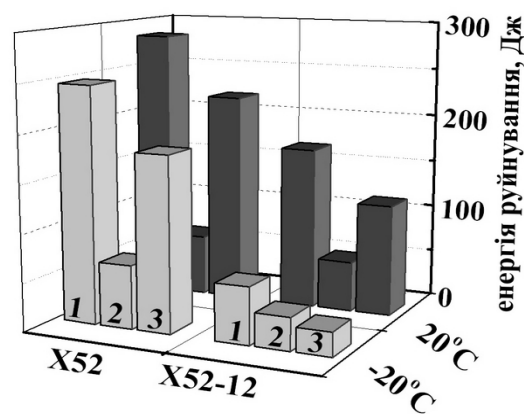


Рисунок 2 – Загальна енергія (1) та компоненти її зародження (2) і поширення (3) тріщини для сталі X52

Деградацію властивостей пов'язують з деформаційним зміцненням матеріалу. Воно проявило себе у досліджуваних сталях як „полочки плинності” на кривих розтягу, підвищенні коефіцієнта деформаційного зміцнення і вичерпанні пластичності. Проте, інші дві особливості механічної поведінки експлуатованих сталей не відповідають закономірностям деформаційного зміцнення: це, по-перше, зменшення твердості за одночасного зниження опору крихкому руйнуванню (зазвичай спостерігаються протилежні тенденції, спричинені, наприклад, термічною обробкою, легуванням, деформацією і т.п.), по-друге – відмінність у характері зміни характеристик пластичності.

Наведені особливості раніше спостерігали під час випробування металу зварного шва паропроводу ТЕС після його тривалої високо-температурної експлуатації [5], а також біметалу “низьколегована сталь корпусу гідрокрекінгу нафти – нержавіюча сталь антикорозійного наплавлення після лабораторного термоцикування у газоподібному водні [6]. Беручи до уваги ці, а також наведені результати, маємо підстави стверджувати, що властиві експлуатаційній деградації властивостей одночасне зниження міцності і опору крихкому руйнуванню, а також протилежна зміна характеристик пластичності є загальними особливостями впливу тривалої експлуатації на конструкційні сталі як за звичайної, так і підвищених температур.

Виявлені аномалії у механічній поведінці тривало експлуатованих сталей можна пояснити за припущення, що деградація металу проявляється не тільки у деформаційному старінні, але і в інтенсивному розвитку пошкоджуваності (дефектності) на мікро- і субмікрорівнях. Деформаційне старіння зміцнило і, таким чином, окрихлило метал, що відбилося у підвищенні коефіцієнта деформаційного зміцнення і зниженні відносного звуження. Крім того, „полочки плинності” на діаграмах розтягу є типовими для сталей з окрихленими границями зерен [7]. Проте деформаційне старіння і розвиток пошкоджуваності діють на міцність у протилежних напрямках. Відповідно, експлуатація металу спричинила протилежний вплив на ха-

характеристики пластичності: деформаційне зміцнення зменшило ψ і δ , тоді як дефектність металу підвищує δ , оскільки не тільки пластична деформація, але і розкриття дефектів (пор) є чинниками видовження зразка,

Суттєві відмінності у зниженні KCV для зразків, вирізаних у протилежних напрямках стосовно геометрії труби, пов'язані з локалізацією процесів деградації між волокнами вальцювання. Ці результати слід брати до уваги під час вибору геометрії зразків стосовно напрямку вальцювання при оцінюванні експлуатаційної деградації труб.

Поділ ударної в'язкості на складові зародження і поширення тріщини показав, що складова поширення тріщини як характеристика механіки руйнування є найчутливішою до зміни стану експлуатованого металу. Це вказує на те, що саме показники механіки руйнування найбільш придатні для оцінювання втрати механічних властивостей експлуатованих труб. Є підстави для припущення, що характеристики опору крихкому руйнуванню чутливі до експлуатаційної деградації сталей за рахунок суттєвого зниження саме складової поширення тріщини, яку можна вважати показником механіки руйнування.

Чутливість характеристики KCV до деградації металу більш виражена за низькотемпературних випробувань, тобто за умов окрихлення. Звідси можна рекомендувати для таких цілей випробовування за пониженої температури, а також оцінювати експлуатаційну деградацію ефективніше і за інших умов, які окричують метал (зокрема, експериментами на КР і ВО), що показано відповідними експериментами [3, 10].

Принципове питання про роль транспортного середовища у деградації труб за їх тривалої експлуатації. Можна припустити, що втрата вихідних властивостей спричинена лише дією робочих напружень. Так, вплив експлуатації на параметри ВО і твердість показав, що саме ділянки „низ труби” визначаються гіршими властивостями. Очевидно, водний конденсат всередині газопровідної труби акумулюється на її дні, і його можна розглядати як джерело наводнювання металу зсередини труби. Крім того, нижча тріщиностійкість металу ближче до внутрішньої поверхні труби теж можна розглядати як прояв водневого чинника, інтенсивність якого залежить від концентрації водню вздовж січення труби.

Оцінювання експлуатаційної деградації за зміною електрохімічних характеристик

Для оцінювання деградації металу застосовують структурно-чутливі фізичні методи дослідження: внутрішнє тертя, коерцитивну силу, питомий опір, модуль нормальної пружності тощо. Однак більшість із наведених вище методів орієнтовані на оцінювання інтегральних властивостей всього об'єму металу, тоді як структурні зміни, ріст внутрішніх напружень і розвиток мікропошкодженості протікають в

локальних його об'ємах, що, як правило, обумовлює їх низьку чутливість. Стосовно оцінювання пошкодженості, низьку методів наведено в огляді [8]. Виділимо серед них метод, який базується на визначенні параметрів розсіювання значень твердості, а також акустичної емісії і кінетичної твердості.

Що стосується електрохімічних характеристик, то вони використовуються традиційно як показники корозійної тривкості матеріалу у певному корозивному середовищі та для встановлення механізму корозійного процесу. Водночас вони чутливі до структурного та напруженого стану металу. Отже, використання електрохімічних показників може бути перспективним для технічного діагностування стану матеріалів конструкцій, що тривало експлуатуються [9], в тому числі як методів неруйнівного контролю. В останньому випадку треба враховувати те, що в польових умовах можна визначати електрохімічні показники лише поверхні елемента конструкції, тоді як деградація металу всередині стінки труби може бути суттєвішою.

До числа електрохімічних показників, які потенційно можна використовувати для цієї мети, можуть належати потенціал корозії E_{cor} , коефіцієнти Тафеля b_a і b_c , струм корозії і струм при певному анодному потенціалі $j_{кор}$ і j_a відповідно, та поляризаційний опір R_p . На прикладі досліджуваної сталі X52 встановлено, що поляризаційний опір і струм корозії є найбільш чутливими до деградації властивостей сталей (рис. 3).

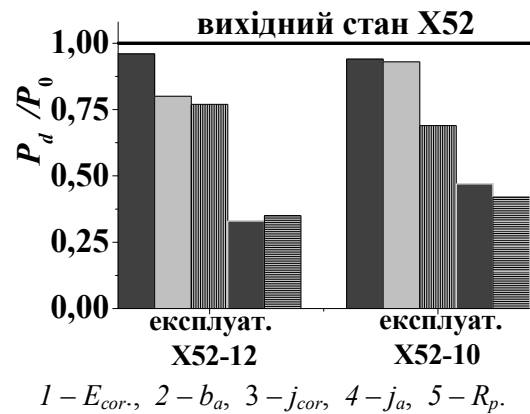


Рисунок 3 – Вплив тривалої експлуатації на електрохімічні характеристики сталі X52 відносно їх початкового значення

Під час вибору середовища для електрохімічних вимірювань необхідно враховувати ту обставину, що в результаті взаємодії поверхні з електролітом утворюється, як правило, поверхневий плівки з певними бар'єрними властивостями. Тоді виміряні електрохімічні параметри будуть відбивати також і стан поверхневої плівки, а це буде спотворювати електрохімічний відклик на зміну стану самого матеріалу в результаті його експлуатації.

Для прикладу, оцінювання гравіметричним методом корозійної тривкості газопровідної сталі у модельному розчині водного конденсату

Література

не виявили значних змін швидкості корозії для експлуатованого 30 років та неексплуатованого металу [3]. Це зумовлено захисними властивостями товстих поверхневих плівок з продуктів корозії, що сформувалися впродовж 7 і 30 діб експозиції. Водночас порівняльні оцінки поляризаційного опору і струму корозії, а також швидкості корозії у перемішуваному середовищі (тобто за умов, коли поверхневі плівки практично відсутні) засвідчили суттєві відмінності цих показників для матеріалу у вихідному стані та після тривалої експлуатації. Отже, у цьому випадку вони, як і механічні та корозійно-механічні характеристики, чітко вказують на експлуатаційну деградацію трубної сталі.

Порівняння зміни внаслідок тривалої експлуатації, з одного боку, їх механічних властивостей, а з іншого – електрохімічних параметрів, вказує на чітку кореляцію між ними (рис. 4). Якщо оцінювати ці електрохімічні параметри на практиці (а це доступно в польових умовах), то таку кореляцію можна використати для розроблення відповідного методу неруйнівного контролю стану матеріалу.

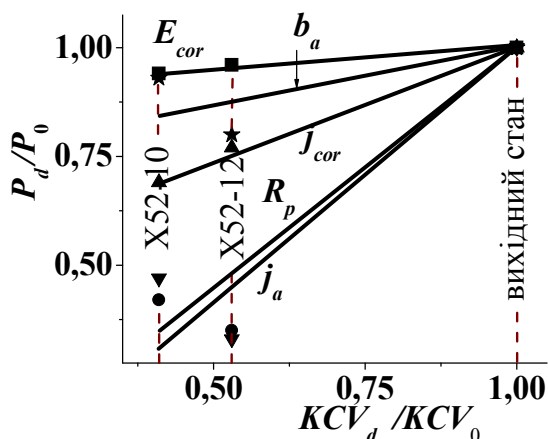


Рисунок 4 – Кореляція відносної зміни електрохімічних характеристик експлуатованої сталі X52 з відносною зміною ударної в'язкості

Висновки

Тривала експлуатація магістральних газопроводів спричиняє зміну механічних властивостей сталі в об'ємі стінки труби, найсуттєвіше характеристик опору крихкому руйнуванню. Показники опору поширенню тріщини особливо чутливі до експлуатаційної деградації сталей, а значний спад ударної в'язкості пов'язаний зі зменшенням складової опору поширення тріщини. Відносно видовження може виявитися характеристикою псевдопластичності, оскільки її підвищення не відбиватиме фізично кращої здатності до пластичного деформування, а розкриття дефектів розсіяної пошкоженості.

Показано перспективи використання електрохімічних методів для розвитку неруйнівного методу контролю експлуатаційної деградації сталей газопроводів.

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

2 B.S. Covino, Jr., S.J.Bullard, S.D.Cramer et al. Detecting internal corrosion of natural gas Transmission pipelines: field tests of probes and systems for real-time corrosion measurement // Proc. of the European Corrosion Congress "Eurocorr 2005". – Portugal: Lisbon, 2005. – Paper № 396.

3 Gabetta G., Nykyforchyn H.M., Lunarska E. et al. In-service degradation of gas trunk pipeline X52 steel // Physicochemical Mechanics of Materials. – 2008. – № 1. – С. 88-99.

4 Gabetta G. and Margarone M. Corrosion and flow models predictions compared using case histories / NACE Corrosion Conference Expo Paper 07522, Nashville, USA, April 2007 – 13 p.

5 Nykyforchyn H.M., Student O.Z., Markov A.D. Abnormal behavior of high-temperature degradation of the weld metal of low-alloy steel welded joints / Materials Science. – 2007. – №1. – P. 77-84.

6 Lublinska K., Tsyruhnyk O., Hredil M. et al. Stress corrosion cracking of the clad structural steels after its high temperature hydrogen degradation // Advances in Materials Science. – 2007, 7. – №. 1. – P. 27-32.

7 Берштейн М.Л. Прочность стали // Сер. "Успехи современного металловедения". – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.

8 Лебедев А.А. Новые характеристики деградации материала на стадии развития рассеянных повреждений // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2008. – №4. – С. 35-44.

9 Цирульник О.Т. Оцінювання електрохімічними методами експлуатаційної деградації низьколегованих сталей та алюмінієвих сплавів // Машинознавство. – 2008. – №6. – С. 19-25.

10 Цирульник О.Т., Никифорчин Г.М., Петрина Д.Ю. та ін. Воднева деградація тривало експлуатованих сталей магістральних газопроводів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007.– №5.– С. 97–104.

Стаття поступила в редакційну колегію
12.08.09
Рекомендована до друку професором
Петриною Ю.Д.