

ОСОБЛИВОСТІ АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ПІДТРИМКИ НАДІЙНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ГАЗОВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ (Огляд)

О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: asmilenin@ukr.net

Проведено аналітичний огляд особливостей експлуатації, експертного аналізу технічного стану та підтримки надійності магістральних газопроводів при транспортуванні ними сумішей природного газу та водню. На основі сучасних уявлень про водневу деградацію трубних сталей розглянуто умови, необхідні для безпечного використання для цього існуючої газотранспортної системи, в тому числі, за різної концентрації водню в суміші. Сформульовано додаткові вимоги щодо оцінки припустимості типових дефектів та порядку їх усунення методами зварювання під тиском. Бібліогр. 33, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: газоводнева суміш, магістральний газопровід, воднева деградація, технічний стан, надійність, ремонт

Вступ. Використання водню та інших відновлювальних газів як засобу передачі енергії від віддалених джерел (перш за все, сонячних і вітрових електростанцій, станцій переробки біоматеріалів тощо) набуває наразі все більшого поширення, зокрема в рамках прийнятої Європейською Комісією «Водневої стратегії ЄС до 2050 року» [1]. Це обумовлено низкою факторів економічного, екологічного та технологічного характеру, в тому числі, інтенсивним розвитком «зеленої» енергетики. Так, використання «зелених» технологій для виробництва електроенергії пов'язане з певною локалізацією енергогенеруючих потужностей у залежності від їх типу (місця встановлення сонячних панелей великої площі, вітрогенераторів тощо), що вимагає розв'язання задачі транспортування

виробленої електроенергії до загальних мереж. Побудова нових ліній електропередач потребує суттєвих фінансових витрат, що підвищує загальну собівартість «зеленої» енергії. Тому одним із можливих шляхів її передачі до кінцевого споживача є використання розгалуженої системи газопроводів для транспортування, перш за все, «зеленого» водню, отриманого шляхом електролізу води або інших його типів, показаних на рис. 1 [2, 3]. Такий підхід є раціональним із позиції більшої ефективності передачі енергії при транспортуванні водню трубопроводами, збільшення частки відновлювальної енергетики в загальному обсязі енергогенеруючих потужностей, зменшення залежності промисловості від викопних вуглеводнів, зокрема природного газу [4].



Зелений водень

- Отримується шляхом електролізу води
- Процес забезпечується електрикою з нульовим рівнем викидів вуглекислого газу (наприклад, вітрова чи сонячна енергія)
- Чистий, але занадто дорогий для широкого використання
- Очікується, що вартість електrolізаторів і відновлюваної енергії знизяться протягом наступного десятиліття, що зробить зелений водень більш конкурентним
- Є ідеальним довгостроковим способом виробництва водню без викидів парникових газів



Блакитний водень

- Виробляється з викопного палива (як правило, природного газу), але викиди обробляються за допомогою технології уловлювання та зберігання вуглецю (CCS)
- За наявності великої кількості природного газу та вугілля міг би допомогти масштабувати водневу економіку, але це залежить від ширшого впровадження CCS
- Може слугувати проміжним етапом від сірого/бурого до зеленого водню



Сірий/бурий водень

- Сірий водень зазвичай отримують з природного газу в процесі, який називається паровим реформуванням метану
- Бурий водень отримують газифікацією бурого вугілля
- Це домінуючі методи, які використовуються сьогодні
- Вони відносно дешеві, але супроводжуються викидами великої кількості вуглецевого газу

Рис. 1. Приклад класифікації водню за методами його промислового виробництва [2]

Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>

© О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак, 2022

Проте безпосереднє використання газотранспортної системи (ГТС) для транспортування водню пов'язане з підвищенням ризиків аварійних ситуацій, тому що проектні умови магістральних та розподільчих трубопроводів з точки зору вибору матеріалів, умов експлуатації, порядку технічного обслуговування не враховують великої концентрації цього елемента в транспортованому газі. З метою використання існуючої ГТС для транспортування водню без суттєвих змін у конструкціях трубопроводів раціональним є використання сумішей природного газу та водню [5–7]. За певного вибору концентрації водню в такій газозводневій суміші (ГВС) негативний вплив водню на міцність та працездатність трубопроводів може бути припустимим. Проте при виборі як експлуатаційних параметрів, так і порядку проведення технічної діагностики, аналізу технічного стану, підтримання працездатності та гарантування надійності ГТС необхідно враховувати не тільки матеріалознавчі аспекти впливу водню на матеріал магістральних газопроводів (МГ), але й використовувати відповідні підходи механічної інженерії, які дозволяють врахувати характерні особливості стану конструкційних елементів магістральних трубопроводів при транспортуванні ними ГВС у контексті відповідних стандартів і норм.

Метою даного огляду є узагальнення даних про особливості експлуатування, аналізу та підтримки технічного стану та працездатності МГ при транспортуванні сумішей природного газу та водню.

Особливості впливу водню на матеріал магістральних газопроводів. Відомо, що сталь підземного газопроводу може бути гідрогенізованою як із зовнішньої поверхні труби в області пошкодження захисної ізоляції через корозійну дію ґрунту, так і з внутрішньої – через електрохімічну взаємодію з конденсованою вологою, що містить водень, або в результаті дисоціації газоподібного водню [8]. Прикладні аспекти негативного впливу водню на механічні властивості металів і конструкцій довготривалої експлуатації є предметами постійної уваги як експлуатуючих організацій різних галузей промисловості, так і науково-дослідних груп по всьому світу. Це дозволило виявити та узагальнити характер водневого пошкодження типових трубних сталей, хоча залишається певне недостатнє розуміння його механізмів [9]. Так, воднева деградація властивостей сталей залежить від їх міцності. Високоміцні сталі більш схильні до впливу водню, ніж маломіцні, при цьому зміна пружних властивостей незначна, проте пластичність, параметри опірності різним видам руйнування (гранична міцність на розрив, в'язкість

руйнування, порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень, швидкість зростання втомних тріщин) можуть погіршуватися зі збільшенням концентрації водню [10].

Відомо, що інтегральна концентрація дифузійного водню є певною мірою якісним показником стану наводнення матеріалу, бо більш важливою є локалізована концентрація на вершині вже існуючих дефектів несучільності матеріалу, де атомарний водень може рекомбінувати до молекулярного стану [11]. У результаті рекомбінації всередині пасток формується високий локальний гідростатичний тиск, що призводить до збільшення внутрішніх мікронапружень. Це викликає формування та розвиток як розподіленої пошкодженості матеріалу, так і макродефектності за різними механізмами [12–14]: водневе розтріскування під напруженням (HSC); формування воднево-індукованих тріщин (HIC/HAC); сповільнене водневе руйнування (SOHIC); розтріскування м'якої зони (SZC); ступінчасте розтріскування (SWC); сульфідне розтріскування під напруженням (SSC); формування блістерів; корозійне розтріскування під напруженням (SCC).

Характер і масштаб негативного впливу водню залежать від різних факторів, включаючи хімічний склад сталі труб, розподіл і морфологію фаз, структуру зерна, сегрегацію та розподіл легуючих елементів і домішок. Тому для оцінки надійності елементів МГ в умовах транспортування ГВС необхідно окремо враховувати вплив надлишкової наводненості металу монтажних зварних швів (МШ) та зони термічного впливу (ЗТВ) на граничний стан трубопроводу за умов проектного навантаження. Як показали результати експериментальних досліджень зразків з МШ, ЗТВ і основного металу трубних сталей за різного ступеня наводнення, найбільш вразливим до негативного впливу водню є метал ЗТВ, де формується крупнозерниста стовпчаста структура [15]. При цьому найбільша деградація спостерігається для втомних характеристик металу ЗТВ, що необхідно враховувати при визначенні можливості та умов транспортування ГВС конкретними ділянками ГТС.

Окремим явищем, яке є характерним для конструкцій тривалої експлуатації при транспортуванні речовин, що містять водень, є накопичення розсіяного пошкодження матеріалу [16, 17]. Процес накопичення такого типу пошкодження (старіння металу) прийнято розділяти на декілька етапів [18]. На I етапі старіння, міцність і твердість металу збільшуються, а характеристики пластичності та опірності крихкому руйнуванню зменшуються. На II етапі для визначення характеристик пластичності матеріалу слід враховувати його

фактичний нетто-переріз, оскільки на отримуваних результатах лабораторних досліджень істотно впливає розкриття множинних мікрodefektів під час розтягуючого навантаження, що призводить до похибки у визначенні істинної пластичності. З цієї ж причини можуть знижуватись міцність і твердість матеріалу.

Характерні проблеми в забезпеченні надійності магістральних трубопроводів при транспортуванні сумішей водню та природного газу. Вимоги до умов експлуатації існуючої ГТС України базуються на комплексі стандартів і норм, що регламентують різні аспекти проектування, аналізу технічного стану та порядку обслуговування трубопроводів. Перепрофілювання магістральних трубопроводів систем для транспортування ГВС потребує врахування особливостей впливу підвищеної концентрації водню на експлуатаційні характеристики елементів ГТС. Так, відомо, що висока текучість водню, з одного боку, підвищує енергетичну ефективність прокачування ГВС, з іншого, обумовлює зростання ризику витоку транспортованого газу [19]. З точки зору управління цілісністю магістральних трубопроводів прийнято розглядати наступні причини появи локального витоку [20]: корозійне пошкодження; дефектність матеріалу; дефектність технологічної природи; помилки при проектуванні чи експлуатаванні; розподілене навантаження; інше навантаження; несправність обладнання; інше.

Як видно з результатів розрахунку коефіцієнта ризику (по різним матеріалам трубопроводів) та сумарного ризику (враховуючи ймовірність настання критичної ситуації) аварійної ситуації через витік транспортованої ГВС із різним об'ємним вмістом водню (0...50 %) (табл. 1), найбільші ризики мають місце в області корозійних пошкоджень і технологічних дефектів (вм'ятин, зги-

нів, гофрів тощо) [21]. Технологічні дефекти, що з'являються, зокрема, при спорудженні чи технічних роботах на окремих ділянках трубопроводів у відкритому шурфі, практично не змінюються в процесі експлуатації трубопроводу, на відміну від корозійних пошкоджень, які є характерними для ГТС України в силу її загальної зношеності. Тому збільшення відповідних ризиків на 15...20 % (при концентрації водню до 20 %) має бути обґрунтованим додатковими розрахунками ризиків настання граничного стану конкретних ділянок трубопроводів із виявленими дефектами корозійних стоншень як на момент проведення діагностики, так і за умови розвитку дефектності в процесі подальшого експлуатування МГ. Надлишкова міцність ділянки трубопроводу з корозійними пошкодженнями має бути достатньою, для того щоб компенсувати відповідне збільшення ризиків при транспортуванні ГВС. Слід зазначити, що наведені розрахунки враховують різні типи матеріалу трубопроводів (трубна сталь, полімери тощо), тому стосовно української ГТС ці показники необхідно розглядати більше як якісні. Проте вони показово відображають вплив водню різної концентрації в складі ГВС на схильність магістральних трубопроводів до руйнування через витік.

Той факт, що більшість магістральних трубопроводів прокладено під землею, певною мірою зменшує можливі наслідки витоку газу чи ГВС, але при аналізі можливості використання окремих ділянок існуючої ГТС необхідно враховувати розташування трубопроводів відносно інших інфраструктурних об'єктів, таких, як житлові будинки, мости, автомобільні чи залізничні шляхи, мережі електропостачання тощо. Будівельні норми [22], в яких сформульовано вимоги до прокладання магістральних трубопроводів, містять залежності відстані від вісі трубопроводу

Таблиця 1. Розрахунковий ризик руйнування МГ в залежності від природи руйнування та складу газоводневої суміші [21]

Причини аварії	Ймовірність, (%)	Коефіцієнт ризику (%)				Сумарний ризик (%)			
		Природний газ	< 20% H ₂	20...50% H ₂	>50% H ₂	Природний газ	<20% H ₂	20...50% H ₂	>50% H ₂
Корозійне пошкодження	36,42	24,54	29,54	29,54	44,54	8,94	10,76	10,76	16,22
Дефектність матеріалу	6,98	34,16	39,16	39,16	54,16	2,38	2,73	2,73	3,78
Розподілене навантаження	8,47	25,58	35,58	35,58	45,58	2,17	3,01	3,01	3,86
Дефектність технологічної природи	15,39	50,00	60,00	70,00	70,00	7,69	9,23	10,77	10,77
Інше навантаження	1,86	10,00	15,00	15,00	30,00	0,19	0,28	0,28	0,56
Несправність обладнання	6,75	30,00	35,00	35,00	50,00	2,02	2,36	2,36	3,37
Помилки при проектуванні чи експлуатаванні	2,53	30,00	35,00	35,00	50,00	0,76	0,89	0,89	1,27
Інше	21,60	10,00	15,00	15,00	30,00	2,16	3,24	3,24	6,48
Загалом	100,00	214	264	274	374	26	33	34	46

до об'єкта певного типу в залежності від діаметра трубопроводу та його класу (див. приклад табл. 2). Але природно очікувати, що фатальні наслідки загоряння чи вибуху ГВС (перш за все, людські жертви) вищі, ніж у випадку природного газу, тому необхідно сформулювати більш жорсткі умови щодо взаємного розташування магістральних чи розподільчих газопроводів та інших об'єктів чи споруд.

Як показали наявні результати досліджень ризику фатальних наслідків вибуху ГВС з різною концентрацією водню [21], характерною особливістю є збільшення ризиків від аварійних ситуацій при більшій локалізованості високих ризиків до безпосереднього місця витoku. Так (як показано на рис. 2) на відстані близько 265 м від вісі трубопроводу з витком ГВС ризики фатальних наслідків займання фактично не залежать від концентрації водню та дорівнюють такій для природного газу, а при більших відстанях висока летучість водню навіть зменшує відповідні ризики. Але для менших відстаней необхідно вводити додаткові поправки до існуючих вимог [22]. Ця додаткова поправка до відстані для концентрації водню в ГВС до 25 % складає близько 100 м, а при 50 % водню – близько 150 м. У разі, якщо на певних ділянках трубопроводів розташування інфраструктурних об'єктів не задовольняє таким більш жорстким умовам, безпосереднє використання цих ділянок для транспортування ГВС без попереднього перенесення трубопроводу чи захисту відповідних об'єктів неприпустиме. Ці ж висновки необхідно застосовувати для паралельних ниток трубопроводів, що розташовані в безпосередній близькості одна від одної, а також при плануванні прокладання нових МГ вздовж вже існуючих.

Окрема увага має бути приділена трубопроводам, де можливе втомне руйнування, а саме: ділянкам на виході з компресорних станцій, підземним, підводним чи надземним переходам через природні та штучні перешкоди тощо. Відомо, що Таблиця 2. Приклад нормативних відстаней від вісі підземних газопроводів до різних об'єктів в залежності від класу та діаметра труб [22]

Об'єкти, споруди, будівлі	Мінімальна відстань від вісі газопроводу, м							
	Клас трубопроводу							
	I				II			
	Умовний діаметр труби, мм							
	< 300	300...600	600...800	800...1000	1000...1200	1200...1400	≤ 300	> 300
Міста та інші населені пункти; окремі промислові підприємства; окремі будівлі з масовим скупченням людей; аеропорти	100	150	200	250	300	350	75	125
Території газорозподільних станцій	50	75	100	125	150	175	50	75
Гирла нафтових, газових та артезіанських свердловин	30	50	100	150	175	200	30	50
Залізничі загальної мережі	75	125	150	200	225	250	75	100

в умовах підвищеної концентрації водню відбувається зростання схильності матеріалу до спонтанного розвитку втомних тріщин [23]. Тому для використання цих ділянок МГ для транспортування ГВС необхідним є зменшення періоду контролю їх технічного стану з метою виявлення появи тріщиноподібних дефектів. Особливо це стосується місць монтажного та ремонтного зварювання, де додаткові розтягувальні залишкові напруження в області шва та ЗТВ зумовлюють підвищену схильність до зародження тріщин за умов зовнішнього циклічного навантаження.

Відповідно до вимог [22] магістральні трубопроводи та їх ділянки поділяються на категорії в залежності від умов прокладання, типорозмірів труб і експлуатаційних параметрів. У залежності від категорії конкретної ділянки (В, I, II, III, IV) визначаються коефіцієнти запасу умов експлуатації при розрахунках на міцність і стійкість, норми кількості зварних з'єднань, що підлягають неруйнівному контролю, параметри випробувань тощо. Для гарантування відповідної надійності трубопроводів при транспортуванні ГВС категорійність окремих ділянок має бути змінена. Зокрема це стосується повітряних переходів і переходів

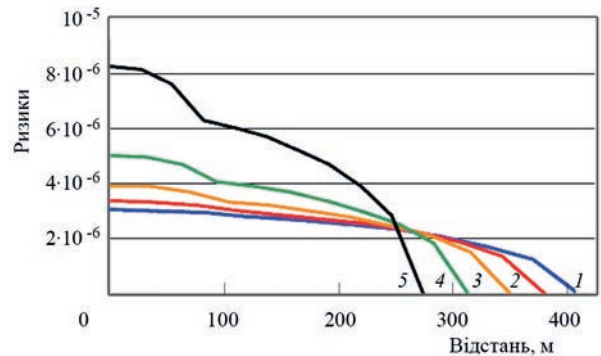


Рис. 2. Залежність ризику (за один рік) смертельного випадку в результаті аварії від відстані до трубопроводу (діаметр 914 мм, тиск 7 МПа) за різної концентрації водню у транспортованій ГВС: 1 – чистий природний газ; 2 – 25 % водню; 3 – 50 % водню; 4 – 75 % водню; 5 – чистий водень [21]

через залізничні колії та автомобільні шляхи як місць підвищеної небезпеки. Стандарт [22] регламентує для цього випадку підвищення на одну категорію та перевірку фактичної відповідності цих ділянок підвищеної категорії.

Порядок оцінки технічного стану магістральних газопроводів з урахуванням підвищеної концентрації водню в транспортованій суміші. Періодична технічна діагностика стану МГ включає в себе заходи неруйнівного контролю, зокрема дефектоскопії, та наступного за ними експертного аналізу відповідності несучої здатності конкретних ділянок проектним умовам. Основний обсяг інформації про стан багатокілометрових ділянок лінійних частин трубопроводів отримується за результатами внутрішньотрубної діагностики (ВТД), яка полягає в пропусканні серії інтелектуальних поршнів разом із транспортованим продуктом [24, 25]. На сьогодні існує широкий спектр інструментальних засобів ВТД, які дозволяють з достатньою точністю виявляти, вимірювати, кількісно оцінювати дефектність різного типу. Проте окрім підвищеної небезпеки експлуатації дефектоскопів у водневому середовищі їх використання пов'язано з тим же комплексом проблем негативного впливу водню на властивості металевих компонентів, що характерний і для металу трубопроводу. Тому в конструкціях дефектоскопів для ГВС із вмістом водню більше 10 % мають бути використані матеріали з найбільшою стійкістю до водневої деградації. Також відомо про негативний вплив водню на довготривалу цілісність постійних магнітів з рідкоземельних металів [25, 26], що необхідно враховувати при використанні відповідних елементів, зокрема при магнітній дефектоскопії (MFL).

У разі виявлення дефектів несучільності необхідним є прийняття рішення щодо їх припустимості та планування заходів по відновленню несучої здатності трубопроводу. Припустимість дефектів (двовимірних – тріщин, тривимірних – корозійних пошкоджень, дефектів форми тощо) магістральних трубопроводів в Україні регламентується нормативним документом [27], який містить комплекс вимог і алгоритмів проведення розрахунків на статичну міцність ділянок трубопроводів із дефектністю певного типу. Межі застосування [27] дозволяють його використання для оцінки стану газопроводів при транспортуванні ними ГВС, але це вимагає певних формальних уточнень.

Так, в якості критерію граничного стану при розрахунках на статичну міцність використовується порівняння розрахункового та проектного значень запасу міцності конкретної ділянки трубопроводу. При цьому згідно з проектними вимогами [22] коефіцієнт запасу міцності трубопроводу визначається, в тому числі, відповідно до ка-

тегорії конкретної ділянки трубопроводу, яка, як було показано вище, у разі транспортування ГВС має коригуватись. Таким чином, мінімальний припустимий запас міцності також має бути переобчислений, що може змінити висновки щодо несучої здатності дефектної ділянки трубопроводу.

Експертний висновок щодо припустимості конкретного виявленого дефекта МГ полягає, зокрема, в визначенні категорії цього дефекта, а саме: незначний, помірний, значний, критичний. Відповідно до визначеної категорії рекомендовано проводити ремонтно-відновлювальні роботи, знижувати тиск транспортованого продукту або обмежити термін експлуатації з додатковим моніторингом стану дефектної ділянки через 6 або 2 місяці та один раз або двічі на рік. Періодичність додаткового контролю в разі транспортування ГВС може бути змінена з причини недостатньої інформації про інтенсивність розвитку дефекта. Необхідним є підтвердження, що за вказаний період природне збільшення дефекта не призведе до зміни його категорії.

Окремою задачею аналізу фактичного стану МГ за результатами дефектоскопії є визначення його довговічності. Для цього необхідно враховувати наступні пошкоджуючі фактори: деградація механічних властивостей матеріалу; корозійне пошкодження; стрес-корозія; циклічне навантаження.

Деградація властивостей матеріалу з точки зору опірності різним видам руйнування в умовах підвищеної концентрації водню в транспортованому продукті, з одного боку, вимагає більш консервативного експертного аналізу припустимості дефектів, з іншого, потребує визначення часових інтервалів додаткового обстеження чи усунення виявлених дефектів. Як зазначалося вище, найбільший вплив водню спостерігається на параметри міцності (границі текучості σ_T та міцності σ_B), тріщиностійкості (в'язкість руйнування K_{Ic} , K_{Jc}) та на втомну міцність (порогове значення коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK_{th} , швидкість росту втомної тріщини da/dN). Конкретні поточні значення вказаних фізико-механічних характеристик матеріалу трубопроводу в області виявленого дефекта мають визначатися шляхом проведення відповідних лабораторних досліджень із наявними зразками металу труб, що дозволяє врахувати додатковий негативний вплив наводнення при транспортуванні ГВС. Проте на практиці проведення відповідної кількості лабораторних випробувань важко реалізувати, тому при розрахунках на статичну міцність та довговічність прийнято використовувати певні консервативні значення відповідних параметрів. Рекомендовані в [27] підходи по інтерпретації результатів вимірювання твердості матеріалу, його ударної



Рис. 3. Умовна схема впливу взаємодії різних факторів зовнішнього впливу на механізм руйнування конструкційних матеріалів

в'язкості для визначення поточної величини σ_t та σ_b (деградація може досягати 10 %), а також K_{Jc} (до 40 %) можуть бути незастосовними в разі суттєвого розвитку розсіяного пошкодження матеріалу труб у результаті його наводнення. Особливо цього слід очікувати для ділянок трубопроводів із великим напруженням, яких багато в українській ГТС.

Якщо порядок розрахунку впливу корозійного розвитку дефектності при транспортуванні ГВС не змінюється у порівнянні з умовами прокачування природного газу, то надлишковий вміст водню в металі трубопроводу може значно змінити схильність металу до утворення тріщин стрес-корозії. Особливістю магістральних стрес-корозійних тріщин є їх видовженість, яка обумовлена механізмом зростання. Зародження тріщин такого типу є багатоосередковим з подальшим об'єднанням невеликих тріщин у магістральну. Це ускладнює виявлення такого роду дефектності засобами експрес-моніторингу, зокрема ВТД, тому важливим є априорне визначення ділянок трубопроводу, найбільш схильних до стрес-корозії.

Відомо, що необхідною умовою зародження стрес-корозійних тріщин є одночасне виконання трьох умов, а саме: розтягувальні напруження, вищі за пороговий рівень; чутлива структура металу; несприятливе корозійне середовище (рис. 3) [28]. Кожне середовище, яке обумовлює додатковий потік водню в метал і відповідне зростання мікронапружень в області наявних несутцільностей, може призвести до стрес-корозійного розтріскування. Тому для визначення можливості використання існуючої ГТС для транспортування ГВС необхідним є проведення лабораторних досліджень схильності металу труб різних ділянок до стрес-корозійного пошкодження.

Якщо певна ділянка МГ піддається впливу циклічних навантажень, то в разі зародження втомних тріщин довговічність таких ділянок визначається як параметрами тріщиностійкості, так і

швидкістю росту втомної тріщини da/dN . Як показують наявні результати досліджень [29], у присутності водню типові трубні сталі характеризуються не тільки збільшенням da/dN , але й можливою зміною характеру руйнування (рис. 4) з міжкристалітного в транскристалітний. Тому частота технічної діагностики таких ділянок трубопроводів при транспортуванні ГВС має бути збільшеною, а консервативність аналізу тріщиноподібних дефектів вищою.

Застосовність методів ремонту зварюванням елементів магістральних газопроводів із виявленою експлуатаційною дефектністю при транспортуванні ГВС. Для відновлення проектної міцності та роботоздатності елементів МГ з дефектами несутцільності, які було виявлено під час діагностики, все більшого поширення набувають методи ремонту зварюванням під тиском [30]. Це дозволяє підвищувати несучу здатність трубопроводів без необхідності зупинки транспорту продукту, зменшуючи як трудомісткість робіт, так і негативний вплив на довкілля. Проведення такого ремонту регламентується низкою стандартів, зокрема [31], які містять порядок оцінки необхідності ремонту, вибору його типу в залежності від ступеня пошкодженості конкретної ділянки трубопроводу, порядку вибору технологічних параметрів зварювання тощо. Проте в разі транспортування ГВС і суттєвого наводнення металу трубопроводу необхідно враховувати певні особливості стану МГ.

Перш за все, будь-яким ремонтним роботам на діючому МГ мають передувати обстеження можливого витoku водню, що може спричинити вибухонебезпечну ситуацію. Іншим фактором, що обмежує застосування ремонтних зварювальних технологій на діючих трубопроводах, є можливе

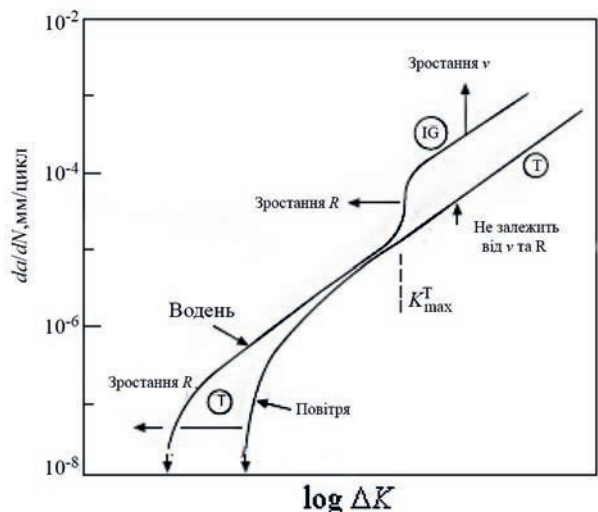


Рис. 4. Схематична діаграма впливу газоподібного водню на швидкість зростання втомних тріщин в сталях: R – коефіцієнт асиметрії циклу навантаження, v – частота навантаження, T – переважно транскристалітне руйнування, IG – переважно міжкристалітне руйнування [29]

холодне розтріскування металу в області зварювання та настання аварійної ситуації. Відомо, що для утворення холодних тріщин на певних ділянках конструкції, що зварюється, мають бути одночасно виконані три умови, а саме: наявність мартенситної структури металу, дифузійного водню та розтягувальних напружень [32]. Тому для запобігання появи холодних тріщин прийнято уникати додаткового притоку водню шляхом підготовки місця зварювання та відповідного вибору присадних матеріалів, а також застосовувати попередній підігрів області ремонту на рівні 100...150 °C в залежності від типорозміру труби, її міцності та температури оточуючого середовища [31]. Але прискорена деградація властивостей металу трубопроводу при транспортуванні ГВС збільшує схильність до холодного розтріскування, тому рекомендації щодо підготовки трубопроводу до ремонту мають бути жорсткішими. Проведення такого роду робіт за температур навколишнього середовища нижче 0 °C та інтенсивне охолодження області зварювання може створити несприятливі умови щодо схильності структури металу до холодного розтріскування. Крім того, температура попереднього підігріву має бути збільшена (до мінімально припустимого рівня 150 °C) та підтримуватися на кожному етапі багатопрохідного ремонтного зварювання чи наплавлення.

Наявність додаткових ремонтних зварних швів, які було отримано в польових умовах, знижує довговічність трубопроводу в разі інтенсивного наводнення металу з-за більш інтенсивної водневої деградації МШ та ЗТВ [33]. Тому в разі використання існуючої ГТС для транспортування водню при його концентрації в ГВС більше 20 % ремонт зварюванням під тиском слід розглядати, перш за все, як тимчасовий, з подальшою заміною відновленої трубної котушки в період планової зупинки ділянки трубопроводу. Період, на який проведені ремонтно-відновлювальні роботи гарантують належну надійність трубопроводу, має визначатись на основі результатів прогнозування довготривалої міцності в залежності від умов експлуатації, фактичного стану труби та типу ремонту.

Висновки

1. Узагальнено характерні особливості впливу водню на матеріал магістральних трубопроводів з точки зору зниження їх проектної міцності та роботоздатності. Показано, що воднева деградація властивостей сталей залежить від їх міцності, а максимальний негативний вплив спостерігається на пластичність і параметри опірності різним видам руйнування. При цьому найбільша деградація металу спостерігається в областях монтаж-

них зварних з'єднань, які характеризуються більш грубою мікроструктурою.

2. Розглянуто характерні проблеми в забезпеченні надійності магістральних трубопроводів при транспортуванні сумішей водню та природного газу. На основі наявних даних ризик-аналізу аварійності МГ через витік водню показано, що при його концентрації в транспортованій газоводневій суміші до 20 % відбувається відчутне підвищення ризиків через витіки в області корозійних уражень. Тому прийняття рішень щодо можливості використання існуючої ГТС для транспортування газоводневих сумішей має базуватися на відповідній оцінці фактичної дефектності та підтвердженні необхідного залишкового запасу міцності трубопроводів з корозійними ураженнями.

3. Показано необхідність перегляду категорійності окремих ділянок МГ у разі транспортування ними ГВС. Зокрема це відноситься до повітряних переходів через штучні та природні перешкоди, а також до підземних переходів через залізничні колії та автомобільні шляхи, як місць підвищеної небезпеки, для яких необхідним є підвищення на одну категорію.

4. Розглянуто особливості оцінки технічного стану трубопроводів з урахуванням підвищеної концентрації водню в транспортованій суміші. Показано необхідність уточнення періодичності неруйнівного контролю з урахуванням більш інтенсивного впливу типових пошкоджуючих факторів при транспортуванні ГВС для гарантування необхідної статичної міцності та довговічності МГ. Крім того, рекомендовані існуючими нормативними документами методи експрес-оцінки фактичних властивостей трубопроводу є обмежено застосовними в разі транспортування ГВС.

5. Проаналізовано застосовність методів ремонту зварюванням під тиском газопроводів при транспортуванні ними суміші природного газу та водню. Показано, що основною технологічною задачею при цьому є запобігання утворення холодних тріщин в наводненому металі труб, що можливо досягти вибором відповідної температури попереднього підігріву місця ремонтного зварювання та жорсткішими вимогами до припустимих температур навколишнього середовища. Крім того, наявність додаткових ремонтних зварних швів знижує загальну стійкість трубопроводів до крихкого та втомного руйнування, що необхідно враховувати при його подальшій експлуатації.

Список літератури

1. Golombek, R., Lind, A., Ringkjøb, H.-K., Seljom, P. (2022) The role of transmission and energy storage in European decarbonization towards 2050. *Energy*, **239**, Part C, 122159. DOI:https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122159
2. (2022) *Rising to the challenge of a hydrogen economy. Report*. Norway, DNV.

3. Gondal, I.A. (2016) *Hydrogen transportation by pipelines. Compendium of Hydrogen Energy*. Volume 2: Hydrogen Storage, Transportation and Infrastructure. UK, Woodhead Publishing. 301–322. DOI:https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00012-2
4. Quarton, C.J., Samsatli, S. (2018) Power-to-gas for injection into the gas grid: What can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **98**, 302–316. DOI:https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.007
5. Melaina, M.W., Penev, M., Zuboy, J. (2015) *Hydrogen Blending in Natural Gas Pipelines*. Handbook of Clean Energy Systems. USA, John Wiley & Sons Ltd. DOI:https://doi.org/10.1002/9781118991978.hces205
6. Martin, M.L., Connolly, M., Buck, Z.N. et al. (2022) Evaluating a natural gas pipeline steel for blended hydrogen service. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **101**, 104529. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104529
7. Ishaq, H., Dincer, I. (2020) A comprehensive study on using new hydrogen-natural gas and ammonia-natural gas blends for better performance. *Ibid*, **81**, 103362. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103362
8. Nykyforchyn, H., Unigovskiy, L., Zvirko, O. et al. (2021) Pipeline durability and integrity issues at hydrogen transport via natural gas distribution network. *Procedia Structural Integrity*, **33**, 646–651.
9. Нецаев Ю.С. (2008) Физические комплексные проблемы старения, охрупчивания и разрушения металлических материалов водородной энергетики и магистральных трубопроводов. *Успехи физических наук*, **178**, 7, 709–726. Nechaiev, Yu.S. (2008) Physical complex problems of aging, embrittlement and fracture of metallic materials of hydrogen energy and main pipelines. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, **178**(7), 709–726 [in Russian].
10. Sun, Y., Cheng, Y.F. (2022) Hydrogen-induced degradation of high-strength steel pipeline welds: A critical review. *Engineering Failure Analysis*, **133**, 105985. DOI:https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105985
11. Li, W., Cao, R., Xu, L., Qiao, L. (2021) The role of hydrogen in the corrosion and cracking of steels – a review. *Corrosion Communications*, **4**, 23–32. DOI:https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.10.005
12. Esaklul, K.A. (2017) *Hydrogen damage. Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies Production and Transmission*. UK, Woodhead Publishing, 315–340. DOI:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00013-9
13. Zhou, D., Li, T., Huang, D. et al. (2021) The experiment study to assess the impact of hydrogen blended natural gas on the tensile properties and damage mechanism of X80 pipeline steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, **46**, 10, 7402–7414. DOI:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.267
14. Dmytrakh, I., Syrotiuk, A., Leshchak, R. (2022) Specific mechanism of hydrogen influence on deformability and fracture of low-alloyed pipeline steel. *Procedia Structural Integrity*, Vol. **36**, 298–305. DOI:https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.038
15. Крижанівський Є.І., Тараєвський О.С., Петрина Д.Ю. (2005) Вплив наводнення на корозійно-механічні властивості зварних швів газопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, **1**(14), 29–34. Kryzhanivskiy, Ye.I., Tariaevskiy, O.S., Petryna, D.Yu. (2005) Influence of flooding on corrosion-mechanical properties of welds of gas pipelines. *Rozvidka ta Rozrobka Naftovykh i Gazovykh Rodovyshch*, **1**(14), 29–34 [in Ukrainian].
16. Никифорчин Г., Лунарьська Е., Цирульник О. та ін. (2009) Вплив експлуатаційної розсіяної пошкодженості на закономірності деградації властивостей конструкційних сталей. *Вісник ТДТУ*, **14**, 4, 38–45. Nykyforchyn, H., Lunarska, E., Tsyurulnyk, O.T., Nikiforov, K., Petryna, D., Sydor, P. (2009) Influence of service dispersed damage on regularities of degradation of structural steel properties. *Visnyk TDTU*, **14**(4), 38–45 [in Ukrainian].
17. Nykyforchyn, H., Lunarska, E., Tsyurulnyk, O.T. et al. (2010) Environmentally assisted «in-bulk» steel degradation of long term service gas trunkline. *Engineering Failure Analysis*, **17**, 3, 624–632. DOI:https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.04.007
18. Крижанівський Є.І., Никифорчин Г.М. (2011) Особливості корозійно-водневої деградації сталей нафтогазопроводів і резервуарів зберігання нафти. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **2**, 11–20. Kryzhanivskiy, Ye.I., Nykyforchyn, H. (2011) Peculiarities of corrosion-hydrogen degradation of steels of oil and gas pipelines and oil storage tanks. *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv*, **2**, 11–20 [in Ukrainian].
19. Дорошенко Я.В. (2020) Моделювання витікань газу з газопроводів при аварійних ситуаціях. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, **3**, 22–28. DOI:https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-150-3-22-28 Doroshenko, Ya.V. (2020) Modeling of gas leakage from gas pipelines in emergency situation. *Visnyk VPI*, **3**, 22–28 [in Ukrainian]. DOI:https://doi.org/10.31649/1997-9266-2020-150-3-22-28
20. Li, X., Wang, J., Abbassi, R., Chen, G. (2022) A risk assessment framework considering uncertainty for corrosion-induced natural gas pipeline accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **75**, 104718. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104718.
21. Melaina, M.W., Antonia, O., Penev, M. (2013) *Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks: A Review of Key Issues*. Technical Report. National Renewable Energy Laboratory, Denver West Parkway Golden, Colorado.
22. (2005) СНиП 2.05.06-85. *Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила*. М., ФГУП ЦПП.
23. Murakami, Y. (2019) Hydrogen embrittlement. Metal Fatigue. Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions. Second Edition. USA, Academic Press, 567–607. DOI:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813876-2.00021-2
24. Xie, M., Tian, Z. (2018) A review on pipeline integrity management utilizing in-line inspection data. *Engineering Failure Analysis*, **92**, 222–239. DOI:https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.05.010
25. Barker, T. (2020) In-line Inspection Tool Design and Assessment of Hydrogen Pipelines. *TDW – PPSA Seminar. 17–18 November 2020*, UK, Pigging Products & Services Association, 41–45.
26. Sagawa, M., Une, Y. (2022) *The status of sintered NdFeB magnets. Modern Permanent Magnets*. UK, Woodhead Publishing, 135–168. DOI:https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88658-1.00010-8
27. (2008) ДСТУ-Н Б В.2.3-21:2008. *Настанова. Визначення залишкової міцності магистральних трубопроводів з дефектами*. Київ, Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. (2008) DSTU-N B V.2.3-21:2008. *Directive. Determination of residual strength of main pipelines with defects*. Kyiv, Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine [in Ukrainian].
28. Raja, V.S., Shoji, T. (2011) *Stress Corrosion Cracking. Theory and Practice*. UK, Woodhead Publishing.
29. Xu, K. (2012) Hydrogen embrittlement of carbon steels and their welds. *Gaseous Hydrogen Embrittlement of Materials in Energy Technologies*, **2**, UK, Woodhead Publishing, 526–561.

30. Миленин А.С. (2013) К вопросу планирования ремонта магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации на основе результатов внутритрубной диагностики. *Автоматическая сварка*, **5**, 3–6.
- Milenin, A.S. (2013) On planning of repair of pressurized main pipelines based on the results of in-pipe diagnostics. *The Paton Welding J.*, **5**, 29–38 [in Ukrainian].
31. (2011) ГБН В.3.1-00013741-12:2011 *Магістральні газопроводи. Ремонт дуговим зварюванням в умовах експлуатації*. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.
- (2011) GBN V.3.1-00013741-12:2011. *Main pipelines. Arc welding repair in service conditions*. Kyiv, PWI [in Ukrainian].
32. Махненко В.И., Миленин А.С., Олейник О.И. (2011) Современные проблемы ремонта сухопутных магистральных трубопроводов без вывода их из эксплуатации. *Сб. докладов научно-технического семинара «Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта»*, 10–11 июня 2011, Киев, Украина, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 13–20.
- Makhnenko, V.I., Milenin, A.S., Olejnik, O.I. (2011) Current problems of repair of overland main pipelines without taking them out of service. In: *Proc. of Sci.-Techn. Seminar on Assurance of Service Reliability of Pipeline Transportation Systems (Kyiv, Ukraine, 10-11 June 2011)*. PWI, 13–20 [in Russian].
33. Петрина Д.Ю., Козак О.Л., Петрина Ю.Д. (2013) Корозійно-механічні властивості зварних з'єднань магистральних трубопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, **1(46)**, 37–49.
- Petryna, D.Yu., Kozak, O.L., Petryna, Yu.D. (2013) Corrosion-mechanical properties of main pipeline welded joints. *Rozvidka ta Rozrobka Naftovykh i Gazovykh Rodovyshch*, **1(46)**, 37–49 [in Ukrainian].

FEATURES OF ANALYSIS OF THE TECHNICAL STATE AND SUPPORT OF RELIABILITY OF THE MAIN GAS PIPELINES AT TRANSPORTATION OF GAS-HYDROGEN MIXTURES (REVIEW)

O.S. Milenin, O.A. Velikoivanenko, G.P. Rozyinka, N.I. Pivtorak

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: asmilenin@ukr.net

Analytical review of the features of operation, expert analysis of the technical condition, and support of the reliability of the main gas pipelines at transportation of natural gas and hydrogen mixtures through them was performed. Proceeding from modern concepts of hydrogen degradation of pipe steels, conditions are considered which are required for safe use of the currently available gas transportation system for this purpose, in particular, with different hydrogen concentration in the mixture. Additional requirements were formulated as to evaluation of the acceptability of typical defects, and procedure of their repair by pressure welding methods. 33 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: gas-hydrogen mixture, main gas pipeline, hydrogen degradation, technical state, technical state, reliability, repair

Надійшла до редакції 07.04.2022

XXI МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2022 МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

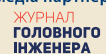
15 - 18 листопада



Генеральний інформаційний партнер:



Ексклюзивний медіа партнер:



**МІЖНАРОДНИЙ
ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**
м. Київ, Броварський пр-т, 15
станція метро «Лівобережна»

+38 (044) 201-11-65, (56)

plast@iec-expo.com.ua

www.iec-expo.com.ua

