

ЧИСЕЛЬНА ОЦІНКА КРИХКОЇ МІЦНОСТІ МОНТАЖНИХ ЗВАРНИХ ШВІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ГАЗОВОДНЕВИХ СУМІШЕЙ

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

У рамках аналізу можливості використання української газотранспортної системи для транспортування сумішей природного газу та водню розглянуто особливості впливу водневої деградації трубної сталі на крихку міцність кільцевих монтажних зварних з'єднань. Для цього використано методи скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану конструкцій при зварюванні та подальшій експлуатації разом із сучасними критеріями макроскопічного руйнування тіла з тріщиною. Результати прогнозування коефіцієнтів запасу крихкої міцності типової зварної ділянки магістрального газопроводу з постульованими поверхневими тріщинами при транспортуванні газоводневих сумішей різного складу показали, що найбільш схильними до крихкого руйнування є ділянки шва та зони термічного впливу. Але стосовно втомної міцності зварних з'єднань під дією циклічного навантаження внутрішнім тиском чи моментом згину, більші розмахи значень коефіцієнта інтенсивності напружень у зоні термічного впливу зумовлюють суттєвіше зменшення залишкових коефіцієнтів запасу при прогнозуванні довготривалої крихкої міцності. Бібліогр. 15, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: газоводнева суміш, магістральний газопровід, воднева деградація, технічний стан, крихка міцність, циклічне навантаження

Вступ. Практична перспектива використання української газотранспортної системи для транспортування сумішей вичерпаного природного газу та зеленого водню вимагає відповідного обґрунтування безпеки експлуатації газогонів. Окрім контролю можливих витоків і накопичення газоподібного водню, при аналізі технічного стану газогонів необхідно враховувати різні аспекти водневої деградації трубної сталі. При цьому одним з найуразливіших місць є монтажні кільцеві зварні з'єднання з відповідними залишковими полями напружень і деформацій, викликаними монтажним зварюванням у польових умовах. Це зумовлює більшу схильність до появи різного роду дефектів несучільності металу (непроварів, пітингової корозії, стрес-корозійного розтріскування тощо) та підвищення ризиків зародження неприпустимої пошкодженості конструкції в результаті дії статичного або циклічного експлуатаційного навантаження.

Як показав аналіз фахових літературних джерел [1–4], проблема водневої деградації трубних сталей є достатньо широко висвітленою, проте переважну більшість робіт присвячено розв'язанню матеріалознавчих задач виявлення особливостей взаємодії дифузійного водню з металом у певному стані, у тому числі після зварювання. Кінцевою метою подібних досліджень є визначення закономірностей деградації механічних властивостей типових матеріалів у результаті довготривалої експлуатації в середовищі водню. Але актуальним залишається комплекс задач аналізу впливу водневої деградації матеріалу на знижен-

ня несучої здатності та загальне погіршення технічного стану конкретного газопроводу за проектних умов експлуатації. Зокрема відомо, що одним з негативних ефектів підвищеної концентрації дифузійного водню в типових трубних сталях різного класу міцності є зниження їх крихкої міцності та опірності втомному руйнуванню [5]. Аналогічний негативний вплив має монтажне чи ремонтне зварювання, яке зумовлює формування залишкових розтягувальних напружень в області металу шва та зони термічного впливу (ЗТВ), чим сприяє зародженню та розповсюдженню тріщин. Проте розв'язання комплексної задачі аналізу надійності зварних з'єднань трубопроводних систем при транспортуванні ними газоводневих сумішей (ГВС) висвітлені недостатньо повно.

У цій роботі розглянуто питання чисельного аналізу крихкої міцності монтажних зварних швів магістральних газопроводів (МГ) при транспортуванні ГВС з метою визначення особливостей впливу водневої деградації металу труб на їх надійність та працездатність.

Методологія дослідження. Поєднання технологічного фактору впливу зварювання та деградації опірності матеріалу МГ у результаті надлишкового наводнення ускладнює аналіз несучої здатності трубопроводу в області кільцевого монтажного шва. Тому раціональним є використання методів математичного моделювання та комп'ютерної симуляції процесів зварювання з відповідним чисельним аналізом схильності зварної конструкції до руйнування, що дозволяє врахувати різні аспекти

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

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

зовнішнього експлуатаційного впливу на властивості та граничний стан конструкції. Основою оцінки крихкої міцності зварних з'єднань був принцип «віртуальних» дефектів, тобто за допомогою загальних правил механіки руйнування тіл з тріщинами проводився розрахунок граничного стану зварного з'єднання з постульованою тріщиною. Ідея цього розрахунку полягає в тому, що в процесі дефектоскопії зварних з'єднань невеликі тріщиноподібні дефекти (найнебезпечнішими з яких є поверхневі, рис. 1) можуть бути пропущені або вони можуть сформуватися на перших етапах експлуатації конструкції. Використання такого підходу дозволяє врахувати вплив зварювального процесу на залишковий напружено-деформований стан (НДС) в області нероз'єднаного з'єднання, а також взаємодію післязварювальних та експлуатаційних напружень на надійність зварної конструкції.

Для прогнозування поточного та залишкового НДС у перерізі зварної ділянки МГ використовувався скінченно-елементний аналіз кінетики нестационарного температурного поля в області дії джерела зварювального нагрівання та відповідного розподілу напружень і деформацій металу труби. Так, розподіл температур визначався розв'язанням рівняння теплопровідності із залежними від температури теплофізичними характеристиками матеріалу [6]. Розрахунок кінетики НДС конструкції було реалізовано шляхом послідовного простеження пружно-пластичних деформацій від початку зварювання аж до повного охолодження конструкції та подальшого експлуатаційного навантаження в рамках крайової задачі нестационарної термопластичності [7]. Так, компоненти тензора деформацій ϵ_{ij} та напружень σ_{ij} співвідносяться між собою відповідно до узагальненого закону Гука та асоційованого закону пластичної течії [8]:

$$\Delta\epsilon_{ij} = \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma + \Delta\epsilon_T) - \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)^* - (K\sigma)^*, \quad (1)$$

де $i, j = r, \beta, z$ в циліндричній системі координат; δ_{ij} – символ Кронекера; $K = (1-2\nu)/E$ – модуль об'ємного стиску; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуасона; $G = 0,5E/(1+\nu)$ – модуль зсуву; ϵ_T – температурна деформація, символ «*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простеження; Ψ – функція стану матеріалу, яка визначає умову пластичної течії:

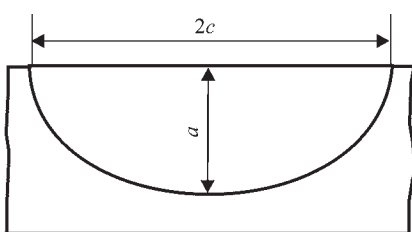


Рис. 1. Схема поверхневої напівеліптичної тріщини

$$\Psi = \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_T, \\ \Psi > \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_T, \quad (2)$$

стан $\sigma_i > \sigma_T$ неприпустимий.

де σ_i – інтенсивність напружень; σ_T – границя текучості.

Визначення функції Ψ здійснювалось ітеруванням на кожному кроці чисельного простеження за часом або збільшення зовнішнього силового навантаження в рамках розв'язання крайової задачі нестационарної термопластичності [8].

Реалізація методу «віртуальних» дефектів для оцінки крихкої міцності зварних з'єднань МГ з різним ступенем водневої деградації металу полягає в постулюванні тріщини певного розміру та орієнтації в кожному з вузлів скінченно-елементного розбиття поверхні труби, у рамках якого визначався сумарний НДС, зумовлений зварюванням та експлуатаційним навантаженням. Для кожного випадку «віртуального» дефекту проводився розрахунок залишкового коефіцієнта запасу крихкої міцності n на основі відповідного критерію граничного стану тіла з тріщиною. Одним з найпоширеніших критеріїв є процедура R6 [9], яка базується на двопараметричній діаграмі крихко-в'язкого руйнування тіла з тріщиною (рис. 2) і має наступне математичне описання:

$$nK_r(L_r) = \begin{cases} \left[1 - 0,14 \cdot (nL_r)^2 \right] \times \\ \times \left\{ 0,3 + 0,7 \exp \left[-0,65 (nL_r)^6 \right] \right\}, \\ \text{якщо } nL_r \leq L_{r\max} \\ 0, \text{ якщо } nL_r > L_{r\max}. \end{cases} \quad (3)$$

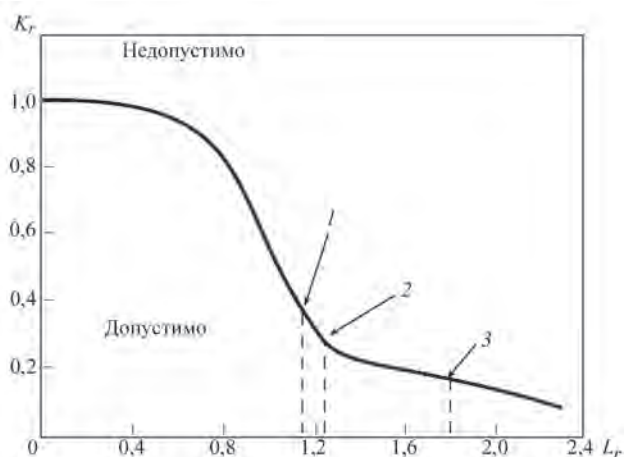


Рис. 2. Двопараметрична діаграма оцінки схильності до крихко-в'язкого руйнування конструкції з тріщиноподібним дефектом [9] 1 – 1,15 (типові низьколеговані сталі та зварні з'єднання); 2 – 1,25 (типові низьковуглецеві сталі та аустенітні зварні з'єднання); 3 – 1,8 (типові аустенітні сталі)

де $K_r = K/K_{lc}$, $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_T$; K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень; K_{lc} – в’язкість руйнування; σ_{ref} – реферативні напруження.

Розрахунок K_p , σ_{ref} , що фігурують у (3), проводиться відповідно до алгоритмів, наведених зокрема в [10].

Аналіз розподілу коефіцієнтів запасу міцності у перерізі конструкції дозволяє оцінити крихку міцність зварного з’єднання залежно від параметрів зварювального процесу, умов зовнішнього силового впливу та водневої деградації матеріалу. Одним з ключових аспектів коректної реалізації даного алгоритму є вибір розміру постульованого дефекту. З одного боку, лінійні розміри тріщини не повинні перевищувати роздільної здатності інструментальних засобів дефектоскопії, з іншого боку, бути досить великими для виявлення схильності зварної конструкції до крихкого руйнування. У якості консервативного підходу можна використати або нормативні вимоги щодо розміру постульованого дефекту, або співвіднести залишковий запас міцності трубопроводу з тріщиною з проектними вимогами [11].

При оцінці працездатності зварного елемента МГ окрім водневої деградації властивостей матеріалу необхідно враховувати можливість втомного руйнування в результаті дії циклічного навантаження. Цей вид руйнування можна розглядати як з точки зору класичних підходів аналізу довготривалої міцності зварних конструкцій з використанням $S-N$ -діаграм [12], так і на основі оцінки допустимості постульованих тріщин за алгоритмами, наведеними вище. При цьому додатково необхідно враховувати втомне зростання розмірів дефектів за певний період експлуатації. Швидкість зростання втомної тріщини (збільшення її лінійних розмірів) у залежності від кількості циклів навантаження N з асиметрією циклу R , розраховується згідно з законом Паріса [13]:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C \cdot \Delta K^m}{(1-R) - \frac{\Delta K}{K_{lc}}}, \quad (4)$$

де C , m – коефіцієнти Паріса; ΔK – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень.

Практичний приклад. Особливості впливу водню в складі транспортованої трубопроводом суміші на міцність монтажних зварних з’єднань

Вплив водню в атмосфері на властивості гладких зразків з тріщиною з втомного металу при випробовуваннях на розтяг і швидкість зростання втомної тріщини [14]

Концентрація водню, об. %	Границя міцності, МПа	Границя текучості, МПа	$C \cdot 10^8$	m
0	656,39	523,90	2,25	2,592
5	666,00	518,56	25,7	2,582
10	657,81	525,52	29,8	2,580
20	656,06	524,83	35,1	2,574
50	661,54	523,67	99,3	2,389

було досліджено на характерному прикладі прямолінійної ділянки МГ діаметром $D = 1420$ мм і товщиною стінки $t = 20$ мм, матеріал труби – труба сталь 17Г1С. У якості зовнішнього навантаження розглядався внутрішній тиск транспортованої ГВС (максимальне значення $P = 7,5$ МПа) та додатково момент згину в площині вісі труби M як для випадку статичного навантаження, так і при циклічному до 10000 циклів. У якості максимального значення величини моменту згину було обрано $8,4 \cdot 10^9$ Н·мм, що відповідає значенням додаткових аксіальних напружень, зіставних з тими, що зумовлені максимальним внутрішнім тиском. У загальному випадку момент згину подібного типу може бути зумовлений різними факторами в залежності від типу та умов експлуатації конкретної ділянки трубопроводу. Так, для ділянок повітряних переходів через штучні чи природні перешкоди додатковий згин типово формується за вітрових навантажень чи при проходженні снарядів внутрішньотрубною діагностики (особливо за резонансного збільшення амплітуди коливань). Для підводних ділянок МГ подібний додатковий силовий вплив може з’являтися при порушенні цілісності розподіленого баластування та циклічної дії підводних течій.

У загальному випадку механічні властивості металу трубопроводного елемента, що розглядається, залежать від концентрації водню v_H в транспортованій ГВС і відповідного ступеня водневої деградації. Згідно з наявними даними [14] найбільший негативний вплив водню на трубні сталі спостерігаються на характеристики опору втомному руйнуванню, що кількісно описується змінами коефіцієнтів Паріса C і m (див. табл.). При цьому за вказаних концентрацій водню в ГВС до 50 % суттєвого зниження в’язкості руйнування K_{lc} не спостерігається [15]. Аналогічно приймалося, що для низьколегованих трубних сталей превалюючим фактором, що впливає на опірність розвитку втомних тріщин в області металу шва та ЗТВ, є значні залишкові напруження (що досягають границі текучості металу) та високі ΔK , тоді як неоднорідність коефіцієнтів Паріса в перерізі зварної конструкції не є суттєвою.

Як зазначалося вище, важливим параметром при розрахунку крихкої міцності зварного елемента МГ є величина постульованої поверхневої трі-

щини $2c \times a$ (див. рис. 1). Для випадку, що розглядається, попереднім розрахунком було визначено, що при $2c \times a = 3,0 \times 0,5$ мм запас крихкої міцності труби на периферії зварного з'єднання складає близько 1,81 і, таким чином, консервативно відповідає проектним вимогам до трубопроводу (1,79). Для коректного врахування тривимірного НДС при розрахунку крихкої міцності розглядалися тріщини різної орієнтації відносно осі труби (повздожні, окружні) та обирався мінімальний коефіцієнт запасу n .

Результати та обговорення. Скінченно-елементний аналіз залишкового НДС в області зварювання кільцевих з'єднань дозволив врахувати технологічний аспект монтажу на надійність і працездатність трубопроводу. Взаємодія експлуатаційних напружень з післязварювальними має суттєво нелінійний характер в обох характерних напрямках відносно осі трубопроводу, а саме окружному та аксіальному (рис. 3, 4). Неоднорідність поля напружень на різних етапах циклічного навантаження зварної ділянки МГ викликає відповідний просторовий розподіл розмахів коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK (рис. 5) і, як

результат, зміну схильності різних ділянок конструкції до крихкого руйнування в процесі довготривалої експлуатації. Найбільш схильними до крихкого руйнування за статичного навантаження є ділянки шва і ЗТВ, які характеризуються високими розтягувальними сумарними напруженнями, зумовленими взаємодією експлуатаційного та післязварювального НДС (рис. 6).

Стосовно втомної міцності зварних з'єднань під дією циклічно змінного внутрішнього тиску чи моменту згину, більші розмахи значень коефіцієнту інтенсивності напружень в ЗТВ зумовлюють суттєве зменшення залишкових коефіцієнтів запасу n при прогнозуванні довготривалої крихкої міцності. Як видно з результатів досліджень (рис. 6), воднева деградація має максимальний вплив на залишковий коефіцієнт запасу крихкої міцності металу ЗТВ в умовах циклічного навантаження внутрішнім тиском: загальне зниження значень n перевищує 25 % у порівнянні з випадком транспортування чистого природного газу. При цьому вплив циклічного моменту згину не настільки суттєво впливає на надійність трубопроводу.

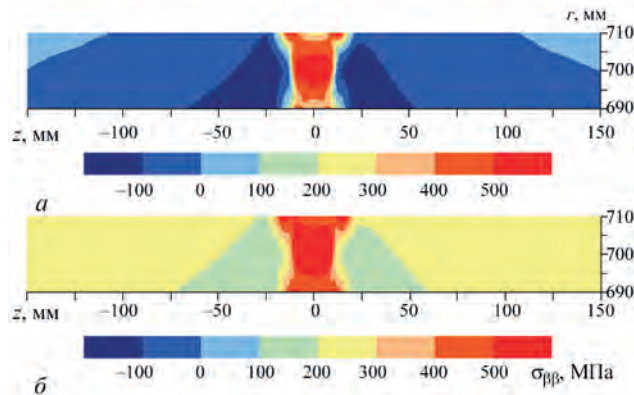


Рис. 3. Розрахункове поле окружних напружень $\sigma_{\phi\phi}$ у повздожньому перерізі труби: *a* – залишковий післязварювальний стан; *б* – за умови навантаження внутрішнім тиском 7,5 МПа

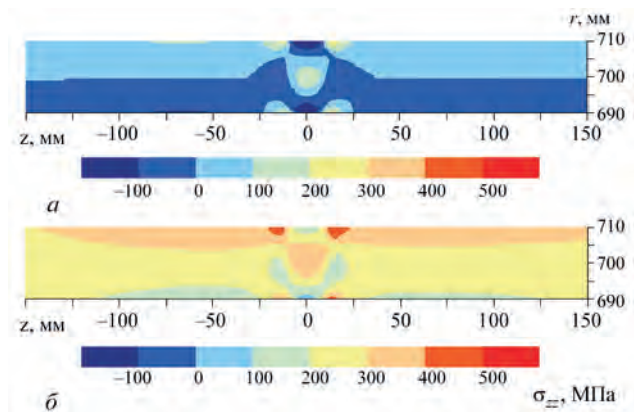


Рис. 4. Розрахункове поле аксіальних напружень σ_{zz} у повздожньому перерізі труби: *a* – залишковий післязварювальний стан; *б* – за умови навантаження внутрішнім тиском 7,5 МПа та моментом згину $8,4 \cdot 10^9$ Н·мм

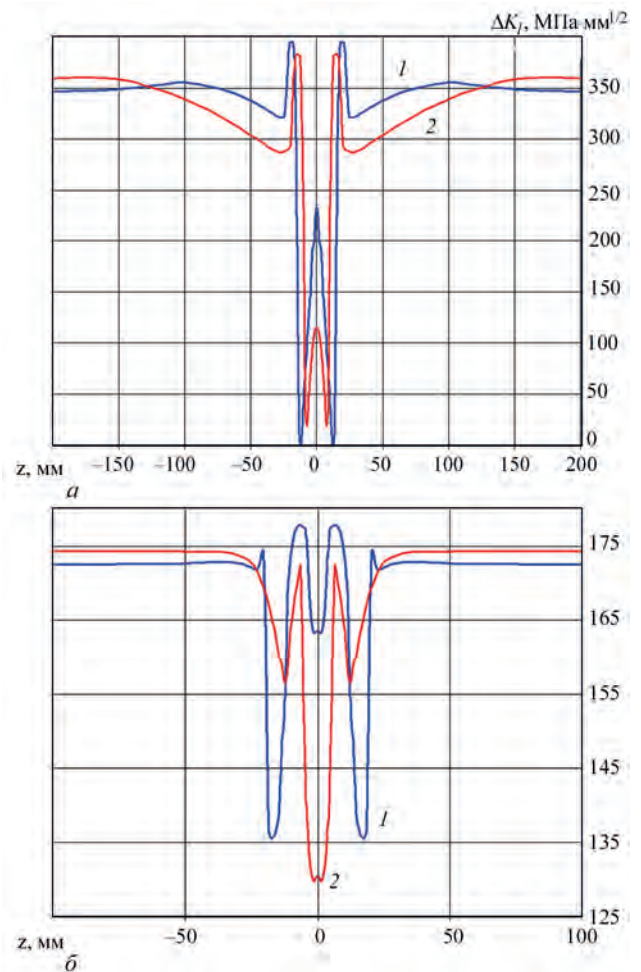


Рис. 5. Розподіл значень розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK вздовж зовнішньої (1) та внутрішньої (2) поверхонь труби після 10000 циклів навантаження внутрішнім тиском (*a*) і моментом згину (*б*)

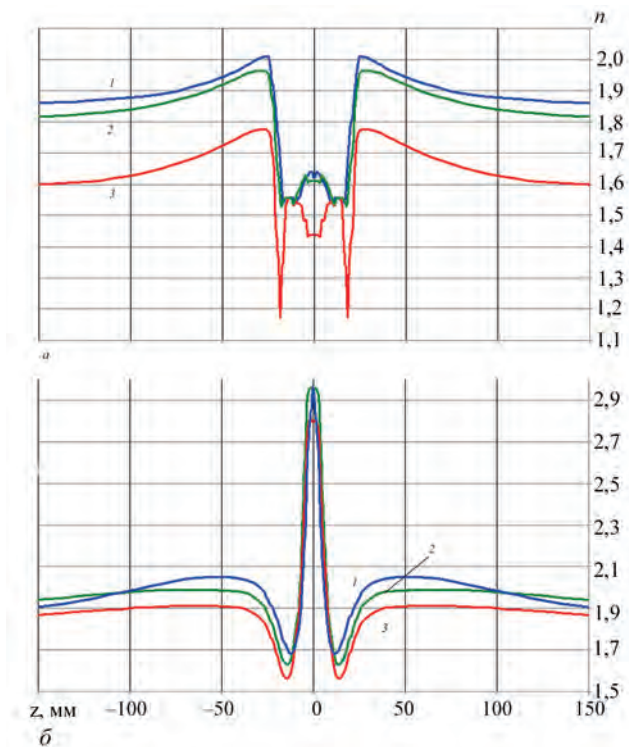


Рис. 6. Розподіл значень коефіцієнта запасу крихкої міцності n вздовж зовнішньої поверхні труби за умов статичного та циклічного навантаження внутрішнім тиском (а) і моментом згину (б): 1 – статичне навантаження ($v_H = 0,5$); 2 – циклічне навантаження ($v_H = 0, 0, 10000$ циклів); 3 – циклічне навантаження ($v_H = 0, 5, 10000$ циклів)

Залежності мінімального коефіцієнта запасу крихкої міцності зварного елемента МГ від об’ємної концентрації водню v_H в транспортованій ГВС в основному металі та в ЗТВ за умов циклічного навантаження внутрішнім тиском і моментом згину квазілінійні, мають різний кут нахилу (рис. 7), що відповідає різній схильності металу до крихкого руйнування при розвиненій водневій деградації та циклічному навантаженні. Цей ефект можна також чисельно характеризувати величиною втомного зростання розмірів тріщини. Так, для випадку циклічної зміни внутрішнього тиску в залежності від концентрації водню в суміші максимальний приріст лінійних розмірів дефекту за 10000 циклів навантаження знаходиться в діапазоні від 0,13 мм (при $v_H = 0\%$) до 4,7 мм ($v_H = 50\%$), для випадку циклічного навантаження моментом згину – від 0,013 до 0,31 мм відповідно.

Слід зазначити, що в рамках цього дослідження розглядається саме крихка міцність металу зварної ділянки МГ, але в області зварного з’єднання, де величина напружень досягає границі текучості матеріалу, граничний стан і макроскопічне руйнування може визначатися в’язким або крихко-в’язким руйнуванням. Але ці види руйнування не є характерними в разі водневого окрихчування металу при довгостроковій експлуатації

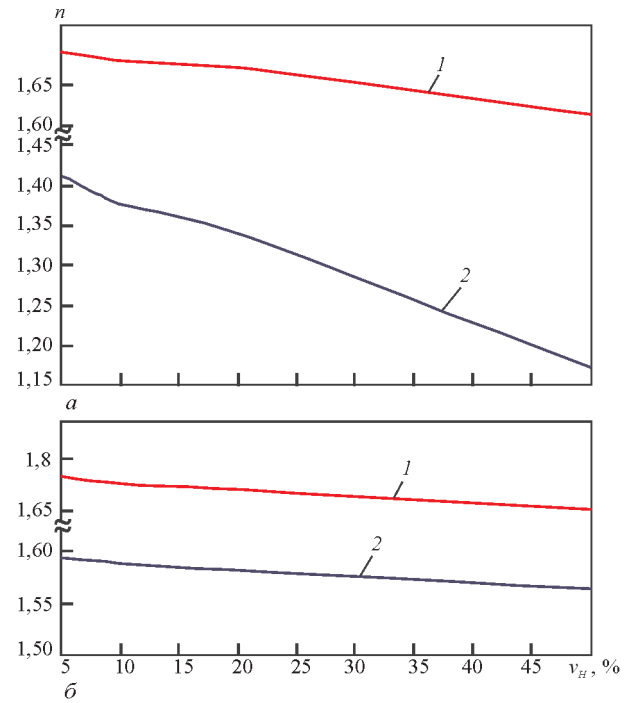


Рис. 7. Залежності мінімального коефіцієнта запасу крихкої міцності зварного елемента МГ від об’ємної концентрації водню v_H у транспортованій суміші в основному металі (1) та в ЗТВ (2) за умов циклічного навантаження (10000 циклів) внутрішнім тиском 0...7,5 МПа (а) і моментом згину 0...8,4·10⁹ Н·мм (б)

трубопроводу в умовах безперервного контакту з наводненим середовищем.

Висновки

1. Розроблено чисельну методику аналізу крихкої міцності зварних ділянок МГ при транспортуванні ними сумішей природного газу та водню. Основою запропонованої методики є скінченно-елементний аналіз НДС конструкції при зварюванні та подальшому експлуатаційному навантаженні, а також розрахунок залишкового запасу міцності в припущенні наявності постульованої поверхневої тріщини певного розміру. При цьому враховувалась можливість прогнозування крихкої міцності як за статичного, так і циклічного навантаження, для чого розраховувалась швидкість втомного зростання розміру дефекту за законом Паріса.

2. На характерному прикладі прямолінійної ділянки МГ ($D \times t = 1420 \times 20$ мм, 17Г1С) було досліджено особливості впливу водневої деградації металу на надійність трубопроводу. У якості зовнішнього навантаження розглядався внутрішній тиск (до $P = 7,5$ МПа) та згинальний момент у площині вісі (до $8,4 \cdot 10^9$ Н·мм). Показано, що найбільш схильними до крихкого руйнування є ділянки шва і ЗТВ, які характеризуються високими розтягувальними сумарними напруженнями, зумовленими взаємодією експлуатаційного та післязварювального НДС. Але стосовно втом-

ної міцності зварних з'єднань під дією циклічного навантаження внутрішнім тиском чи моментом згину, більші розмахи значень коефіцієнта інтенсивності напружень у ЗТВ зумовлюють суттєвіше зменшення залишкових коефіцієнтів запасу при прогнозуванні довготривалої крихкої міцності.

3. Показано, що воднева деградація має максимальний вплив на крихку міцність зварного трубопроводу в умовах циклічного навантаження внутрішнім тиском: 10000 циклів навантаження викликають загальне зниження залишкового коефіцієнта запасу в ЗТВ більш ніж на 25 % у порівнянні з випадком транспортування чистого природного газу. При цьому циклічний момент згину не суттєво впливає на надійність трубопроводу.

Список літератури/References

1. 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.
2. Nechaev, Yu.S. (2008) Physical complex problems of aging, embrittlement and fracture of metallic materials in hydrogen power engineering and main pipelines. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, Vol. 178(7), 709–726 [in Russian].
3. 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>
4. Dmytrakh, I., Syrotyuk, A., Leshchak, R. (2022) Specific mechanism of hydrogen influence on deformability and fracture of low-alloyed pipeline steel. *Procedia Structural Integrity*, 36, 298–305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.038>
5. Nykyforchyn, H., Lunarska, E., Tsyrlunyk, 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>
6. Milenin, O.S., Velykoivanenko, O.A., Rozyuka, G.P., Pivtorak, N.I. (2022) Features of analysis of the technical state and support of reliability of the main gas pipelines at transportation of gas-hydrogen mixtures (Review). *The Paton Welding J.*, 6, 49–56. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.06.07>
7. Karkhin, V.A. (2019) *Thermal Processes in Welding*. Singapore, Springer Singapore.
8. Makhnenko, V. (2013) Problems of examination of modern critical welded structures. *The Paton Welding J.*, 5, 21–28.
9. Milenin, A., Velykoivanenko, E., Rozyuka, G., Pivtorak, N. (2019) Probabilistic procedure for numerical assessment of corroded pipeline strength and operability. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 171C, 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.02.003>
10. (2015) BS 7910:2013+A1:2015 *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. The British Standards Institution.
11. (2007) *Fitness-For-Service. API 579-1/ASME FFS-1. Recommended Practice 579*. Second edition. Washington, API Publishing Services.
12. (1997) СНиП 2.05.06-85 *Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила*. Москва, ВНИИСТ Миннефтегазстроя.
13. Hobbacher, A. (2008) *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. International Institute of Welding. Doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07. Paris, France, October 2008.
14. Furrer, D.U., Semiati, S.L. (2009) *ASM Handbook. Volume 22A. Fundamentals of Modeling for Metals Processing*. Edit. Ohio, ASM International.
15. Meng, B., Gu, C.H., Zhang, L. et al. (2017) Hydrogen effects on X80 pipeline steel in high-pressure natural gas/hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 11, 7404–7412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.145>
16. Stalheim, D., Boggess, T., SanMarchi, C. et al. (2010) Microstructure and mechanical property performance of commercial grade API pipeline steels in high pressure gaseous hydrogen. In: *Proceedings of IPC 2010 8th International Pipeline Conference Calgary, Canada*.

NUMERICAL ASSESSMENT OF BRITTLE STRENGTH OF FIELD WELDS OF THE MAIN GAS PIPELINES AT TRANSPORTATION OF GAS-HYDROGEN MIXTURES

O.S. Milenin, O.A. Velykoivanenko, G.P. Rozyuka, N.I. Pivtorak

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

Features of the influence of hydrogen degradation of pipe steel on brittle strength of circumferential field welded joints were considered within the framework of analysis of the possibility of using the Ukrainian gas-transportation system for transportation of mixtures of natural gas and hydrogen. Applied for these purposes were the methods of finite-element modeling of the structure stress-strain state during welding and further service together with modern criteria of macroscopic fracture of a cracked body. Results of prediction of brittle strength margin of a typical welded section of the main gas pipeline with postulated surface cracks at transportation of gas-hydrogen mixtures of different composition showed that the areas of the weld and heat-affected zone are the most prone to brittle fracture. However, as regards fatigue strength of welded joints, greater ranges of stress intensity factors in the heat-affected zone under the impact of cyclic loading by inner pressure or bending moment, result in an essential reduction of the residual strength margins at prediction of long-term brittle strength. 15 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: gas-hydrogen mixture, main gas pipeline, hydrogen degradation, technical condition, brittle strength, cyclic loading

Надійшла до редакції 06.10.2022

НОВА КНИГА



Corrosion of Aluminium

Christian Vargel

Hardcover ISBN: 9780080999258

eBook ISBN: 9780080999272

Corrosion of Aluminium, Second Edition, highlights the practical and general aspects of the corrosion of aluminium alloys. Chapters help readers new to the topic understand the metallurgical, chemical and physical features of aluminium alloys. Author Christian Vargel adopts a practitioner styled approach that is based on the expertise he has gained during a 40-year career in aluminium corrosion. The book assesses the corrosion resistance of aluminium, a key metric recognized as one of the main conditions for the development of many uses of aluminium in transport, construction, power transmission, and more.