

ОСОБЛИВОСТІ КОРОЗІЇ ТРУБОПРОВІДІВ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ ЗІ СТАЛІ 17Г1С

П. С. ЮХИМЕЦЬ¹, Л. І. НИРКОВА¹, О. П. ГОПКАЛО²,
Р. І. ДМИТРИЄНКО¹, А. Є. ЛИТВИНЕНКО¹, О. Л. ПАЛІЄНКО¹

¹ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

² Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ

Показано, що коливання внутрішнього тиску за температури експлуатації 40°C впливають несуттєво на швидкість виразкової корозії трубопроводів теплових мереж зі сталі 17Г1С, але вона зростає більш ніж в 2 рази за температури 80°C. Корозійний процес прискорюється зі зростанням робочого тиску і є суттєвішим, коли робочі напруження періодично підвищуються до рівня, що відповідає тиску гідравлічних випробувань. Швидкість рівномірної корозії стінки трубопроводу зростає з температурою й накопиченою деформацією. Після тривалого контакту з корозивним середовищем за температури ~ 80°C метал трубопроводу зі залишковою деформацією 1...3% стає, згідно зі шкалою корозійної стійкості металів, малостійким, що підвищує ризик його руйнування. Схильність трубопроводу до корозійного руйнування після тривалої експлуатації в режимі поступового накопичення пластичної деформації підвищується зі зростанням температури.

Ключові слова: теплові мережі, трубопроводи, швидкість корозії, гідравлічні випробування.

It is shown that fluctuations of internal pressure at an operating temperature of 40°C do not have a significant effect on the rate of pitting corrosion of pipelines of heating networks made of 17Г1С steel, which increases more than 2 times at a temperature of 80°C. The acceleration of the corrosion process occurs with an increase in the working pressure, and is more significant in the case when the working stresses periodically increase to a level corresponding to the hydraulic tests pressure. The rate of uniform corrosion of the pipeline wall increases with temperature and the amount of accumulated deformation. After prolonged contact with a corrosive environment at a temperature of ~ 80°C, the pipeline metal with a residual deformation of 1...3% becomes, according to the scale of corrosion resistance of metals, unstable, which increases the risk of pipeline fracture. The tendency of the pipeline to corrosive fracture after long-term operation in the mode of gradual accumulation of deformation increases with temperature.

Keywords: heating networks, pipelines, corrosion rate, hydraulic tests.

Вступ. Корозійні пошкодження є найпоширенішим видом ушкоджень трубопроводів київських теплових мереж, які виявляють, згідно з чинними нормами [1–5], гідравлічними випробуваннями (ГВ) з підвищеним тиском ($P_{\text{нт}}$), що дорівнює 1,25 робочого тиску ($P_{\text{р}}$). Результати дослідження корозійної активності зразків трубних сталей за малоциклового навантаження [6] та навантаження згину [7] свідчать про негативний вплив ГВ на термін служби труб через активізацію корозійного руйнування металу [8].

Мета роботи – визначити вплив тиску $P_{\text{нт}}$ на швидкість виразкової та рівномірної корозії на основі експериментального моделювання умов експлуатації

трубопроводу, що, з огляду на важливість і двоякість ГВ, сприятиме створенню раціональних основ для вибору рівня тиску.

Методи випробувань. Досліджували на зразках основного металу (ОМ) та зварних з'єднань (ЗЗ) труби розміром 630×8 mm завдовжки 2970 mm зі сталі 17Г1С, наданої КП “Київтеплоенерго”, після напрацювання малоциклового пошкодження та створення локальних деформованих ділянок натурального зразка (НЗ) в гідравлічному стенді (ГС); за одноосьового згину, методом 4-точкового навантаження в скобі за сталої деформації згідно з ГОСТ 9.901.2-89 [11]; після циклічного одноосьового навантаження на машині ІП-4М.

В усіх випадках, оскільки зміна швидкості корозії (V , mm/year) найвираженіша в пружно-пластичній області деформування металу [12], імітували напружений стан подавального/зворотного модельного трубопроводу (МТ) Д630 впродовж 5(6) стадій навантаження. Товщина його стінки на початку корозійних досліджень зменшилася до розміру, який забезпечував досягнення в ньому напружень границі плинності σ_y вже під час ГВ. Саме за цих напружень ($\sigma_y = 441,8$ МПа) після зростання тиску до $P = 10$ МПа за допомогою тензодавачів в НЗ зафіксували появу залишкових деформацій ϵ_r . Після кожної стадії випробувань товщина стінки МТ зменшувалася на значення умовної швидкості потоншення (УШП), що дискретно імітувало корозійне пошкодження впродовж року. Це дало змогу моделювати напружено-деформований стан трубопроводу під час його експлуатації збільшенням тиску (напружень) в НЗ за його незмінної товщини.

Корозійні дослідження здійснювали методом масометрії у 3%-му розчині NaCl. Перед дослідженнями зразки обробляли шліфувальним папером різної зернистості від Р320 до Р1000 (згідно з ISO 6344-3), промивали проточною і дистильованою водою та протирали етиловим спиртом. Швидкість суцільної корозії визначали за стандартною методикою при 80 та 40°C (імітація температур води у подавальному та зворотному трубопроводах, відповідно).

Експериментальні дослідження. Корозійні випробування металу НЗ після навантаження в ГС. Підготовка металу до корозійних випробувань складалася з двох етапів навантаження НЗ у ГС: циклічних випробувань та пластичного деформування.

Кожна стадія І-го етапу випробування НЗ імітувала експлуатаційне циклічне навантаження внутрішнім тиском подавальних/зворотних трубопроводів впродовж року: $N = 10$ – кількість циклів збільшення тиску до $P_w = 1,6/0,4$ МПа і його зниження до $P = 0$; $N_{\text{ГВ}} = 1$ – кількість циклів ГВ ($P_{\text{ГВ}} = 2/0,5$ МПа). Початкова товщина стінки s подавального/зворотного МТ 1,42/0,36 mm. УШП стінки подавального МТ (рис. 1) 0,05 mm/year (середнє значення швидкості корозії трубопроводів КП “Київтеплоенерго”). Після кожної стадії випробування перераховували кільцеві напруження σ_θ подавального МТ і відповідного до них тиску в НЗ (рис. 2).

УШП стінки зворотного МТ $\sim 0,12$ mm/year (рис. 1) обумовлена вже визначеним режимом навантаження НЗ (рис. 2).

Другий етап випробувань НЗ – пластичне деформування за ступеневого навантаження в діапазоні 11,6...13,25 МПа з інтервалом $\sim 0,25$ МПа (рис. 2) – імітував накопичення залишкової деформації на стоншених ділянках МТ безпосередньо перед руйнуванням, яке відбулося за тиску в НЗ $P_{\text{max}} = 13,25$ МПа ($\epsilon_r \approx 2,7\%$).

Експонували зразки ОМ і поздовжнього ЗЗ розміром 50×25×2 mm, вирізаних в кільцевому напрямку з металу зон І, ІІ та ІІІ НЗ (рис. 3, 4), у корозивно-активному середовищі впродовж 60, 120 та 240 h.

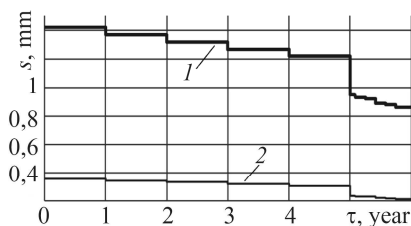


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. Зміна товщини стінки подавального (0,05 mm/year) (1) та зворотного (0,012 mm/year) МТ (2).

Fig. 1. Change of wall thickness of the supply (0.05 mm/year) (1) and return (0.012 mm/year) model pipeline (2).

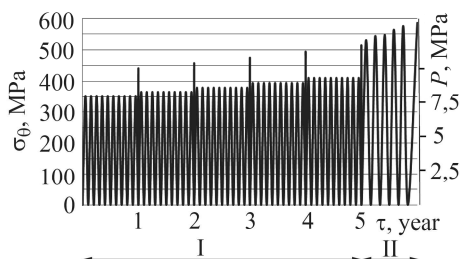


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Напруження σ_{θ} та тиск P у НЗ (подавальному і зворотному МТ) під час I-го та II-го етапів випробувань у ГС.

Fig. 2. Stress σ_{θ} and pressure P in the full-scale sample (model supply/return pipeline) during stage 1 and 2 of laboratory hydraulic tests.



Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Кільцеві зони НЗ для дослідження властивостей металу: I – у вихідному стані; II – після циклічного пружно-пластичного навантаження; III – з максимальною залишковою деформацією.

Fig. 3. Circular zones of a full-scale sample for investigations of the metal properties: I – in an initial state; II – after cyclic elastic-plastic loading; III – with the maximum residual strain.

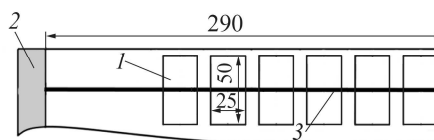


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Схема вирізання зразків ЗЗ (1) з металу зони II (рис. 3) для корозійних випробувань: 2, 3 – кільцевий та поздовжній зварний шов, відповідно.

Fig. 4. Scheme of cutting samples of a weld joint (1) from zone II metal (Fig. 4) for corrosion tests: 2, 3 – circular and longitudinal weld, respectively.

Корозійні випробування за одноосьового згину. Контролювали напруження в зразках (110×14×2 mm), які вирізали з металу зони I у кільцевому напрямку, за величиною прогину. Загальна тривалість випробувань 126 h. Початкову товщину – 1,42 mm та її УШП – 0,05 mm/year приймали однаковими для подавального та зворотного МТ. Зразки використовували для імітації корозії стінки труби за таких режимів навантаження: без внутрішнього тиску; сталий робочий тиск; сталий внутрішній тиск та короточасне ГВ.

Тривалість стадії навантаження зразків ~ 21 h. Короточасне збільшення напруження до значення, еквівалентного тиску $P_{\text{нт}}$, здійснювали після завершення відповідної стадії випробування.

Корозійні випробування після циклічного одноосьового навантаження. Зразки (120×26×2 mm) вирізали зі зони I в одноосьовому напрямку. Початкова товщина стінки подавального/зворотного МТ 1,42/0,36 mm; УШП – 0,025/0,006; 0,05/0,012 та 0,075/0,018 mm/year (рис. 5). Випробовували в режимі м'якого на-

вантаження (коефіцієнт асиметрії циклу навантаження $R = 0$), що призводило до накопичення залишкових деформацій.

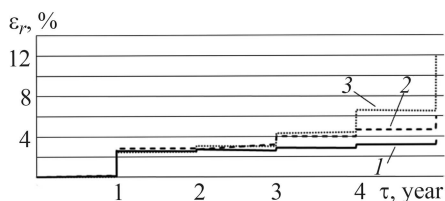


Рис. 5. Накопичення залишкової деформації залежно від УШП та тривалості експлуатації τ подавального/зворотного МТ: 1 – 0,025/0,006; 2 – 0,05/0,012; 3 – 0,075/0,018 mm/year.

Fig. 5. Accumulation of residual strain depending on the conditional wall thinning speed and the term of operation τ of the model supply/return pipeline: 1 – 0.025/0.006; 2 – 0.05/0.012; 3 – 0.075/0.018 mm/year.

Після випробування зразків $120 \times 26 \times 2$ mm з них виготовляли зразки розміром $50 \times 25 \times 2$ mm для корозійних випробувань тривалістю 120 h.

Експериментальні результати та їх обговорення. Корозійні випробування металу НЗ після навантаження в ГС найповніше відтворювали умови роботи реального трубопроводу на ділянках, вражених рівномірною корозією, оскільки метал НЗ деформувався в умовах плоского напруженого стану.

Аналіз експериментальних результатів (рис. 6) свідчить, що швидкість корозії пластично zdeформованого ОМ, в тому числі після періодичних ГВ, має тенденцію до зростання з часом; підвищення температури від 40 до 80°C та пластичне деформування в діапазоні $< 3\%$ сприяє прискоренню корозійного руйнування стінки труби в 1,5–3 рази порівняно з металом у вихідному стані; ОМ під дією пластичної деформації в корозивному середовищі за температури 80°C впродовж тривалого часу є малостійкий, згідно зі шкалою корозійної стійкості [13] (швидкість корозії вище ніж 1 mm/year), що підвищує ризик руйнування трубопроводу під час його періодичних ГВ; корозійна поведінка ЗЗ у вихідному стані та після циклічного навантаження й пластичної деформації аналогічна ОМ.

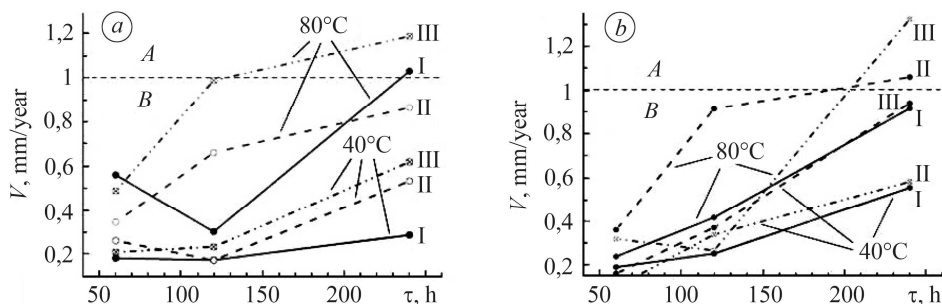


Рис. 6. Зміна з часом швидкості корозії ОМ (a) та ЗЗ (b) залежно від його стану (I, II та III) та температури; A, B – область малої та пониженої стійкості металу, відповідно.

Fig. 6. Change over time of the corrosion rate V of the base metal (a) and the weld metal (b) depending on its state (I, II and III) and temperature; A, B – area of low and reduced stability of the metal, respectively.

Корозійні випробування металу за одноосьового згину відповідали умовам роботи металу в достатньо глибокій корозійній виразці, оскільки пружно-пластичні розтягувальні напруження виникали в тонкому поверхневому шарі зразка і залишкові деформації не накопичувались.

Результати випробувань показані на рис. 7. Помітно, що швидкість корозії суттєво залежить від температури корозивного середовища: її значення при 80°C

(0,131...0,19 mm/year) у 2 рази більше, ніж при 40°C (0,058...0,063 mm/year) залежно від умов навантаження внутрішнім тиском. Умови навантаження тиском при 40°C не спричиняють суттєвого впливу на швидкість корозії. На відміну від цього, при температурі 80°C порівняно з ненапруженим станом відмічене прискорення корозії зразка в ~ 1,45 рази за навантаження, еквівалентного тиску $P_w = 1,6$ МПа і в ~ 1,59 рази, коли напруження періодично підвищують до рівня $P_{ht} = 2$ МПа. Можливою причиною зростання швидкості корозії в останньому випадку є утворення мікропошкоджень поверхневого шару металу внаслідок періодичного підвищення напружень, що полегшує проникнення корозивного середовища до поверхні металу корозійних виразок.

Результати дослідження швидкості корозії металу після циклічного одноосевого навантаження наведені на рис. 8. Як бачимо, за залишкової деформації в діапазоні $\epsilon_r = 5...12\%$ швидкість корозії за температури 80°C є нижчою, ніж за 40°C, що може бути наслідком зниження концентрації кисню з підвищенням температури. Оскільки корозія сталі у нейтральному водному середовищі відбувається з кисневою деполяризацією, зменшення вмісту кисню у розчині сприяє зниженню її швидкості. Ймовірно, що в цих умовах вплив вмісту кисню на корозію є вагомим за накопичену залишкову деформацію. Зазначені особливості швидкості корозії зразків після циклічного одноосевого навантаження потребують додаткового вивчення.

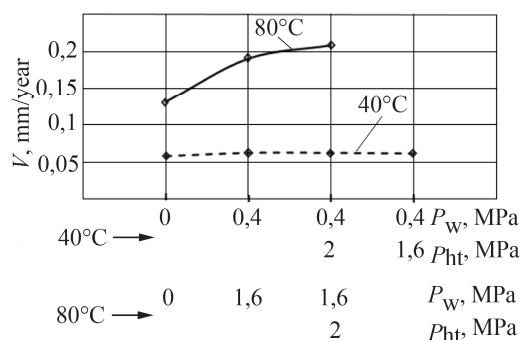


Рис. 7. Fig. 7.

Рис. 7. Швидкість корозії МТ залежно від температури та тисків P_w і P_{ht} .

Fig. 7. Corrosion rate of the model pipeline depending on the temperature, pressure P_w and P_{ht} .

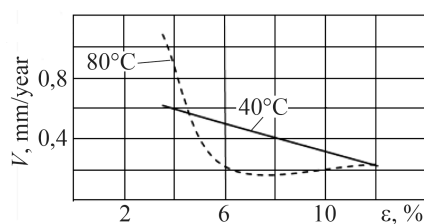


Рис. 8. Fig. 8.

Рис. 8. Швидкість корозії металу НЗ залежно від залишкової деформації, набутої за одноосевого циклічного навантаження, за температури 40 та 80°C.

Fig. 8. Corrosion rate of the full-scale specimen metal depending on residual strain acquired under uniaxial cyclic loading at a temperature of 40 and 80°C.

ВИСНОВКИ

Результати прискорених корозійно-механічних випробувань показали, що зміна тиску за температури 40°C впливає несуттєво на швидкість корозії сталі 17Г1С. За температури 80°C швидкість корозії в ~ 2 рази більша, при цьому корозійний процес прискорюється зі зростанням робочого тиску, і є суттєвішим, коли робочі напруження періодично досягають рівня, що відповідає тиску гідравлічних випробувань ($P_{ht} = 2$ МПа). Результати випробувань металу натурального зразка труби, підданого навантаженню циклічним і статичним внутрішнім тиском, засвідчили, що швидкість рівномірної корозії стінки трубопроводу зростає з накопиченням деформації; після тривалого контакту з корозивним середовищем за температури ~ 80°C метал трубопроводу зі залишковою деформацією 1...3%

стає, згідно зі шкалою корозійної стійкості металів, малостійким, що підвищує ризик його руйнування; схильність трубопроводу до корозійного руйнування після тривалої експлуатації в режимі поступового накопичення пластичної деформації підвищується зі зростанням температури.

1. *ГКД 34.20.507-2003* “Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила”. – Введ. 01.12.2003.
2. *ГКД 34.20.504-94* “Теплові мережі. Інструкція експлуатації”. – Введ. 01.02.1998.
3. *Правила* технічної експлуатації теплових установок і мереж. Наказ МінПЕ № 71 від 14.02.07.
4. *ДНАОП 0.00-1.11-98* Правила будови і безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води. – Введ. 08.09.1998.
5. *Інструкція № 29* “Київенерго”. Проведення випробувань теплових мереж на гідравлічну щільність. – Введ. 16.06.2017.
6. *Плешивцев В. Г., Пак Ю. А. и Филиппов Г. А.* Факторы снижающие конструктивную прочность металла труб и перспективы создания новых трубных сталей для тепловых сетей // 3-я науч.-практ. конф. “Тепловые сети. Современные практические решения”. <http://masters.donntu.org/2012/fmf/kolodyazhnaya/pak.pdf>
7. *Влияние* содержания углерода и напряженного состояния на скорость коррозии трубной стали в тепловых сетях / О. В. Ливанова, Ю. А. Пак, В. Г. Плешивцев, Г. А. Филиппов. <http://naukarus.com/vliyanie-soderzhaniya-ugleroda-i-napryazhennogo-sostoyaniya-na-skorost-korrozii-trubnoy-stali-v-teplovyh-setyah>
8. *Чичерин С. В.* Новый алгоритм анализа величин давления при проведении ежегодных гидравлических испытаний трубопроводов тепловых сетей на плотность и прочность // *Вестн. Иркутского ГТУ*. – 2017. – № 1. – С. 178–185.
9. *ГОСТ 10705-80*. Трубы стальные электросварные. Технические условия. – Введ. 25.12.1980.
10. *ГОСТ 10704-91*. Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент. – Введ. 15.11.1991.
11. *ГОСТ 9.901.2-89*. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Испытания на коррозионное растрескивание образцов в виде изогнутого бруса. – Введ. 28.12.1989.
12. *Гарбер К. Э.* Влияние напряжений на развитие коррозионных процессов в трубопроводах металлургического предприятия. ОАО “Системэнерго”. <http://www.energsovet.ru/stat463.html>
13. *ГОСТ 13819-68*. Коррозия металлов. Десятибалльная шкала коррозионной стойкости. – Введ. 01.01.1969.

Одержано 10.12.2020