

# МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ КРИТИЧНО ПОТОНШЕНИХ ДІЛЯНОК ТЕПЛОПРОВОДУ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ РУЙНУВАННЯ

П.С. Юхимець<sup>1</sup>, Р.І. Дмитрієнко<sup>1</sup>, О.Л. Палієнко<sup>1</sup>, В.М. Єгоренко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: yupeter@ukr.net

<sup>2</sup>КП «Київтеплоенерго». 01001, м. Київ, пл. Івана Франка, 5. E-mail: yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua

Виконано порівняння результатів механічних випробувань металу труби в залежності від типу зразка, накопиченої залишкової деформації та методу їх визначення. Виконано порівняльну оцінку міцності теплопроводу за наявності критично потоншеної зони на основі критеріїв статичної та малоциклової міцності. Отримані результати засвідчили, що виявлена при проведенні механічних випробувань зміна характеристик міцності та пластичності критично потоншених ділянок сприяє підвищенню схильності до малоциклового руйнування теплопроводу при більших залишкових товщинах. При цьому задовільний результат періодичних гідравлічних випробувань не виключає можливості руйнування теплопроводу протягом наступного опалювального сезону внаслідок зростання пошкоджуваності металу критично потоншених ділянок при значних коливаннях робочого тиску. Надано пропозиції щодо визначення тиску гідравлічних випробувань теплопроводів. Бібліогр. 17, табл. 2, рис. 8.

*Ключові слова:* теплопровід, механічні властивості металу, малоциклова міцність, гідравлічні випробування

**Вступ.** Підземні трубопроводи системи теплопостачання зазнають впливу комплексу факторів, що є потенційною причиною їх відмов. Корозійні пошкодження є найпоширенішим видом ушкоджень трубопроводів київських теплових мереж, які виявляють, згідно з чинними нормами, гідравлічними випробуваннями (ГВ) підвищеним тиском ( $P_{ГВ}$ ), що дорівнює 1,25 робочого тиску ( $P_p$ ) [1–6].

Існують деякі розбіжності щодо впливу корозійного середовища, коливання температури, робочих навантажень і напружень на зміну з часом структури та властивостей експлуатованого металу трубопроводів у порівнянні з його вихідними характеристиками. Так, наприклад, згідно з [7] зміна механічних властивостей пов'язана з розвитком процесів окрихчування та проявляється, з одного боку, у зміні показників міцності (твердості НВ, границі міцності  $\sigma_p$ , границі плинності  $\sigma_{0,2}$ ), з іншого – у зниженні показників в'язкопластичного стану (відносного подовження  $\delta$ , відносного звуження  $\psi$ ) та показників опору крихкому руйнуванню ( $KCU$ ,  $KCV$ , критичного значення коефіцієнту інтенсивності напружень  $K_c$ ). У той же час автори [8, 9] вважають, що стандартні механічні властивості ( $\sigma_p$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ )

практично не залежать від терміну експлуатації теплопроводу.

У зв'язку з цим вивчення впливу корозійних уражень на механічні властивості металу критично пошкоджених стінок теплопроводу сприятиме точнішим розрахункам його руйнівного тиску, залишкового ресурсу та дослідженню механізму їх руйнування. Критично пошкодженою в даній роботі вважається ділянка з потоншенням стінки внаслідок корозії, яка має характерну нерівну поверхню у вигляді поєднаних між собою невеликих поглиблень зі згладженими крайками, довжина та ширина якої сумірна з радіусом труби, а товщина стінки обумовлює появу пластичних деформацій при тиску, що не перевищує  $P_{ГВ}$ .

**Мета роботи** – на основі експериментального моделювання умов експлуатації дослідити механічні властивості конструкційного металу критично потоншених ділянок трубопроводу, особливості їх руйнування та надати рекомендації щодо тиску гідравлічних випробувань.

**Методи випробувань.** Дослідження виконувалися на зразках основного металу з тривало експлуатованої прямошовної електрозварної труби КП «Київтеплоенерго»: у вихідному стані, після напрацювання пошкодження протягом п'яти стадій малоциклового навантаження (перший етап)

**Таблиця 1.** Результати спектрального аналізу металу натурального зразка

Характеристика зразка	Масова частка елементів, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo
ГОСТ 19281-89	0,14...0,20	0,4...0,6	1,0...1,4	≤0,040	≤0,035	≤0,30	≤0,30	≤0,30	–
Зразок труби	0,17	0,42	1,24	0,012	0,017	0,023	0,006	0,023	0,008

Юхимець П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-8824-9024>, Дмитрієнко Р.І. – <https://orcid.org/0000-0001-8842-5051>

© П.С. Юхимець, Р.І. Дмитрієнко, О.Л. Палієнко, В.М. Єгоренко, 2022

Таблиця 2. Механічні властивості металу натурального зразка

Характеристика зразка	$\sigma_t$ , МПа	$\sigma_y/\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %
ГОСТ 19281-89	490	345/-	23,0	-
Зразок труби*	590	-/430	18,7	50,9

Примітка. \*Усереднені результати випробувань на розтяг у кільцевому напрямку зразків 7×12 мм (див. далі «Механічні випробування»).

та створення локальних пластично деформованих ділянок (другий етап) натурального зразка (НЗ) на гідравлічному стенді ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України (рис. 1).

Оскільки зміна механічних, як і корозійних, властивостей конструкційного матеріалу помітніша в пружно-пластичній області деформування [12, 13], під час першого етапу імітували напружений стан подавального/зворотного модельного трубопроводу (МТ) Д630 з початковою товщиною стінки  $s = 1,42/0,36$  мм (перша стадія малоциклового навантаження), що забезпечувало досягнення в ньому напружень границі плинності  $\sigma_y = 441,8$  МПа при  $P_{ГВ} = 2/0,5$  МПа (тиск щорічних гідравлічних випробувань трубопроводу). Саме за цих напружень після зростання тиску до  $P = 10$  МПа за допомогою тензодавачів у натурному зразку зафіксували появу залишкових деформацій  $e_r$ . Кожна з п'яти стадій першого етапу випробування натурального зразка імітувала експлуатаційне циклічне навантаження внутрішнім тиском подавальних/зворотних трубопроводів упродовж року:  $N = 10$  – кількість циклів збільшення тиску  $P_{max}$  до значення робочого тиску  $P_p = 1,6/0,4$  МПа і його зниження до  $P_{min} = 0$ ;  $N_{ГВ} = 1$  – кількість циклів щорічних гідравлічних випробувань:  $P_{max} = P_{ГВ} = 2/0,5$  МПа,  $P_{min} = 0$ .

Після кожної стадії випробувань товщина стінки подавального МТ зменшувалася на значен-

ня умовної швидкості потоншення 0,05 мм/рік, яке відповідало середньому значенню швидкості корозії трубопроводів КП «Київтеплоенерго», і дискретно імітувало корозійне пошкодження впродовж року. Для нового значення товщини розраховували кільцеве напруження  $\sigma_\theta$  подавального МТ та відповідну до нього величину тиску в натурному зразку (рис. 2). Умовна швидкість потоншення стінки зворотного МТ  $\sim 0,12$  мм/рік обумовлювалася вже визначеним режимом навантаження натурального зразка (рис. 2). Це дало змогу моделювати напружено-деформований стан критично потоншених ділянок трубопроводу під час його експлуатації збільшенням тиску (напружень) в натурному зразку за незмінної товщини його стінки.

Другий етап випробувань натурального зразка – пластичне деформування за ступінчастого 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 при тиску в натурному зразку  $P_{max} = 13,25$  МПа (залишкова деформація за вимірами периметру труби  $e_r \approx 2,7$  %).

Механічні властивості визначалися на основі статичних випробувань плоских та циліндричних зразків на одноосовий розтяг [14], а також вимірювань твердості за Брінеллем [15].

Для дослідження механічних властивостей труби у вихідному стані було використано пропорційні зразки трьох типів: плоский 5×12 мм (товщина × ширина робочої частини, мм) (рис. 3, а) з механічною обробкою обох поверхонь у напрямку товщини; плоский 7×12 мм (рис. 3, б), поверхні якого співпадали з зовнішньою та внутрішньою поверхнями труби; циліндричний (МІ-12) з діаме-

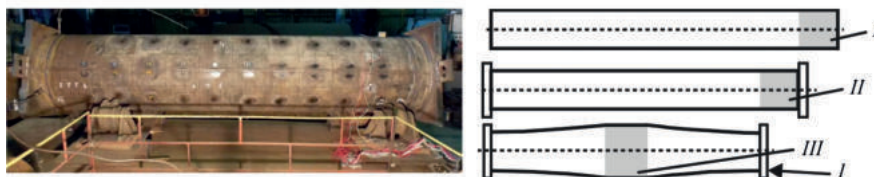


Рис. 1. Вигляд натурального зразка перед випробуванням на гідравлічному стенді (а) та його кільцеві зони для визначення механічних властивостей металу (б): I – у вихідному стані; II – після малоциклового навантаження; III – після ступінчастого пластичного навантаження, I – днище для герметизації труби

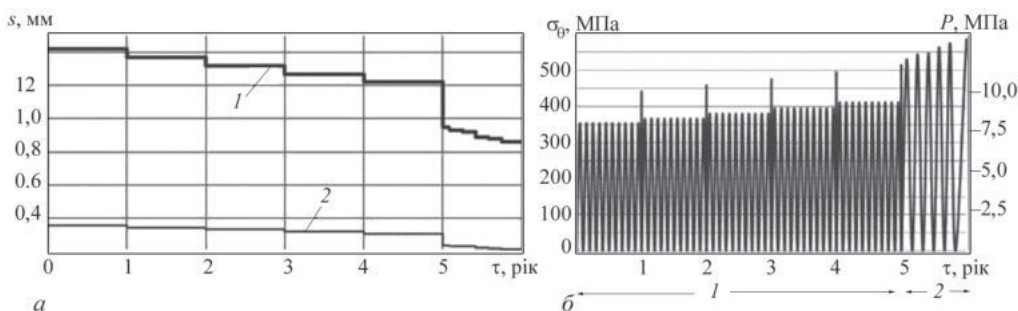


Рис. 2. Зміна товщини стінки  $s$  подавального (0,05 мм/рік) (1) та зворотного (0,012 мм/рік) МТ (2) (а), відповідні кільцеві напруження  $\sigma_\theta$  й тиск  $P$  в натурному зразку протягом 1-го та 2-го етапів лабораторних випробувань (б)

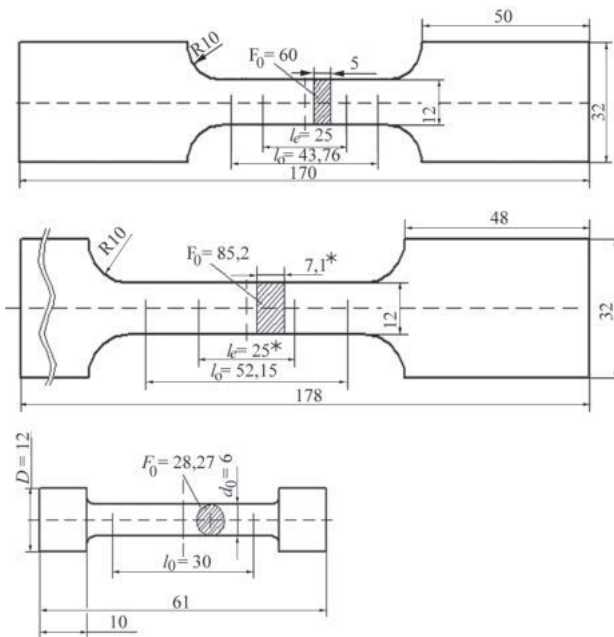


Рис. 3. Зразки для випробувань на розтяг: *a* – плоский з обробкою поверхонь (5×12 мм); *b* – плоский без обробки поверхонь (7×12 мм); *в* – циліндричний (MI-12);  $l_c$  – початкова розрахункова довжина відповідно до тензометра;  $l_0$  – початкова розрахункова довжина;  $F_0$  – початкова площа поперечного перерізу

трім робочої частини 6 мм (рис. 3, *в*). Зразки вирізалися з труби в кільцевому та поздовжньому напрямках. У більшості кільцевих зразків місця під захвати перед фрезуванням випрямлялися в пресі таким чином, щоб не деформувати робочу частину. Деякі з кільцевих зразків (5×12, 7×12 мм) підлягали випрямленню включно з робочою частиною (на рис. 4, 5 додатково позначені літерою *b*).

Механічні випробування виконували на універсальних розривних машинах INSTRON 8802 та MTS-318.25 зі швидкістю деформування 2 мм/хв при постійній температурі ~ 22 °С, початкова база екстензометра – 25 мм, інтервал опитування – 0,1 с. За результатами експериментальних випробувань для кожного зразка визначали характеристики механічних властивостей металу ( $\sigma_r$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta_5$ ,  $\psi$ ).

Для замірів твердості за Брінеллем використовували твердомір Shopper: діаметр кульки – 10 мм,

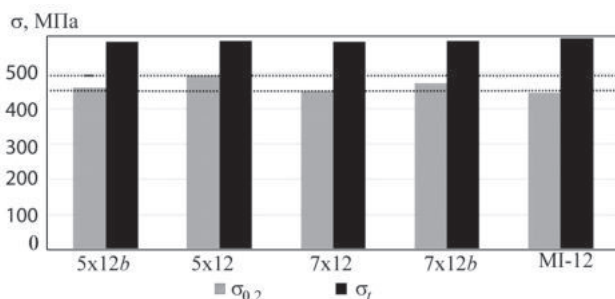


Рис.4. Залежність характеристик міцності ( $\sigma_{0,2}$  – межа плинності умовна,  $\sigma_r$  – межа міцності) основного металу в кільцевому напрямку від типу зразка. Точковими лініями позначена полоса розкиду (10 %) значень  $\sigma_{0,2}$

навантаження – 3000 кгс, витримка під навантаженням – 10 с. Виміри проводилися на шліфованих зразках матеріалу натурального зразка у вихідному стані та після пластичного деформування 0,9 та 3,6 % (рис. 1, *б*). На кожному зі зразків проводилося три виміри. Перерахунок значень твердості у відповідні значення механічних властивостей виконувався з використанням залежностей [16].

Для відстеження зміни локальної залишкової деформації на поверхні труби у вихідному стані було позначено сім кільцевих перерізів, вздовж периметру яких за допомогою керна на відстані 62 мм наносились рівномірно розподілені точки.

**Результати експериментальних досліджень та їх аналіз.** Порівняння результатів механічних випробувань металу труби у вихідному стані в залежності від типу зразка засвідчило, що розкид значень  $\sigma_{0,2}$  та  $\sigma_r$  у випадку кільцевих зразків становив 10 та 2 % (рис. 4), а у випадку поздовжніх зразків – 5 та 4 % відповідно. Розкид значень  $\delta_5$  та  $\psi$  у випадку кільцевих зразків становив 50 та 22 %, а у випадку поздовжніх зразків – 51 та 23 % відповідно (рис. 5). Найконсервативніші значення характеристик міцності та пластичності були отримані при випробуванні зразків 7×12 мм – без деформування та механічної обробки поверхонь робочої частини (рис. 3, *б*), тому для подальших випробувань використовувалися зразки саме цього типу.

Результати визначення механічних властивостей металу натурального зразка в залежності від накопиченої локальної пластичної деформації  $e_p$ , отримані при випробуванні на розтяг зразків типу 7×12 мм та на основі замірів твердості, які наведено на рис. 6, 7, свідчать, що накопичення залишкових деформацій під дією експлуатаційних навантажень трубопроводу призводить до зміни механічних властивостей металу його критично потоншених зон.

Як бачимо, характеристики механічних властивостей, отримані при випробуванні на розтяг зразків у кільцевому напрямку є нижчими, ніж у поз-

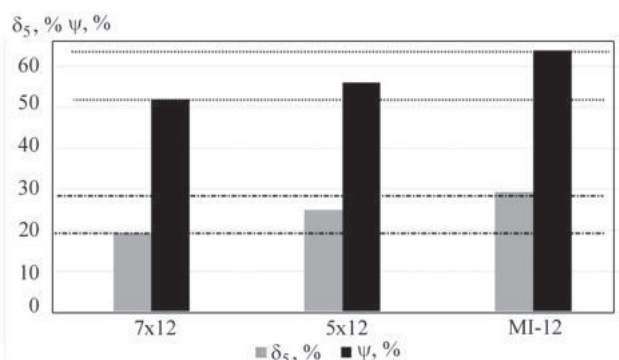


Рис. 5. Залежність характеристик пластичності основного металу ( $\delta_5$  – відносне подовження після розриву;  $\psi$  – відносне звуження після розриву) у поздовжньому напрямку від типу зразка. Штрих-пунктирними лініями позначено полоса розкиду значень  $\delta_5$  (51 %), точковими –  $\psi$  (23 %)

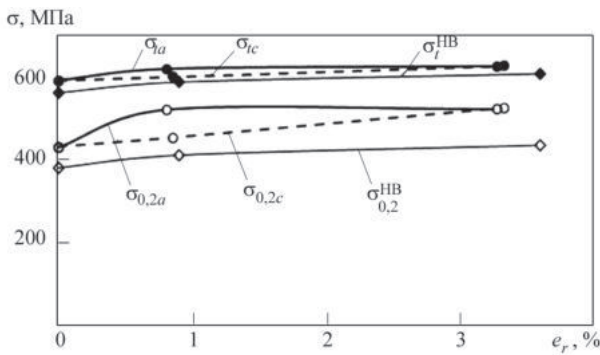


Рис. 6. Середні значення характеристик міцності металу в залежності від залишкової деформації та напрямку. Індексами позначено: *a* – поздовжній напрямок; *c* – кільцевий напрямок; НВ – за вимірами твердості

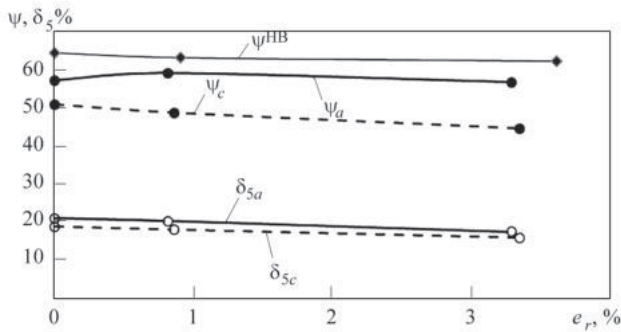


Рис. 7. Середні значення характеристик пластичності металу НЗ в залежності від залишкової деформації та напрямку. Індексами позначено: *a* – поздовжній напрямок; *c* – кільцевий напрямок; НВ – за вимірами твердості

довжніх зразків. Різниця між значеннями  $\sigma_{ic}$  та  $\sigma_{ia}$ ,  $\sigma_{0,2c}$  та  $\sigma_{0,2a}$ ,  $\delta_{5c}$  та  $\delta_{5a}$ ,  $\psi_c$  та  $\psi_a$  знаходиться в межах 0...3, 0...15, 9...13, 13...8 % відповідно. Зі зростанням залишкової пластичної деформації від 0 до 3,5 % відбувається збільшення характеристик міцності  $\sigma_{ic}$  та  $\sigma_{ia}$  на ~6 %;  $\sigma_{0,2c}$  та  $\sigma_{0,2a}$  – на ~22 %. При цьому характеристики пластичності в кільцевому напрямку  $\delta_{5c}$  та  $\psi_c$  зменшуються на 16 та 13 %; а в поздовжньому напрямку  $\delta_{5a}$  та  $\psi_a$  – на 15 та 1 % відповідно. Відзначимо, що зміна механічних характеристик металу труби в кільцевому напрямку спричиняє найвагоміший вплив на її міцність.

Характеристики механічних властивостей, визначені на основі вимірів твердості, демонструють у залежності від локальної пластичної деформації такі самі тенденції, що й відповідні результати випробувань на розтяг. Розраховані значення напружень  $\sigma_t^{HB}$  та  $\sigma_{0,2}^{HB}$  є нижчими за характеристики міцності  $\sigma_{ic}$  та  $\sigma_{0,2c}$  на 3...6 та 10...18 %, а  $\sigma_{ia}$  та  $\sigma_{0,2a}$  – на 3...6 та 12...22 % відповідно. Відносне звуження  $\psi^{HB}$  перевищує аналогічні характеристики відносного звуження зразків у кільцевому  $\psi_c$  та осьовому  $\psi_a$  напрямках на 27...40 та 7...13 % відповідно.

Експлуатація подавальних/зворотних трубопроводів теплових мереж здійснюється при порівняно низьких номінальних напруженнях  $\sim 0,2\sigma_{0,2}/0,1\sigma_{0,2}$ . Внаслідок цього пружна робота стінки трубопро-

воду забезпечується протягом тривалого періоду за умов потоншення стінки ділянок трубопроводу внаслідок внутрішньої корозії. Міцність трубопроводу при одноразовому навантаженні внутрішнім тиском визначається у зазначених випадках, як правило, мінімальним значенням товщини стінки.

Вплив змінного внутрішнього тиску в процесі експлуатації теплопроводів створює передумови малоциклового руйнування металу критично потоншених зон при їх пружнопластичному деформуванні. Граничний стан за ознакою малоциклового руйнування (1) пов'язаний з двома основними типами ушкодження – квазістатичним та втомним, що досягається переважно внаслідок одностороннього накопичення деформацій, які дорівнюють деформаціям при статичному розриві, або без вираженого накопичення односторонніх деформацій відповідно до [17]:

$$d_f + d_s = \int_1^{N_f} \frac{dN_i}{dN_{fi}} + \int_0^{e_f} \frac{de_r}{e_f} = 1 \quad (1)$$

де  $d_f$  і  $d_s$  – доля втомного та квазістатичного пошкодження відповідно;  $N_i$  – кількість циклів *i*-го режиму навантаження;  $N_{fi}$  – допустима кількість циклів *i*-го режиму навантаження;  $e_f$  – наявна пластичність.

Унаслідок низької концентрації напружень на поверхні критично потоншених ділянок трубопроводу при циклічному навантаженні стиснення деформацій відсутнє, характер зміни напружень і деформацій можна прийняти відповідними м'якому навантаженню (постійна амплітуда напружень). У цьому випадку для наближеної оцінки циклічної міцності використовується рівняння:

$$\sigma_{maxi} N_{fi}^{0,08} = \sigma_t N_t^{0,08} \quad (2)$$

де  $\sigma_{maxi}$  – максимальне напруження в циклі навантаження *i*-го режиму; приймається  $N_t = 10$ .

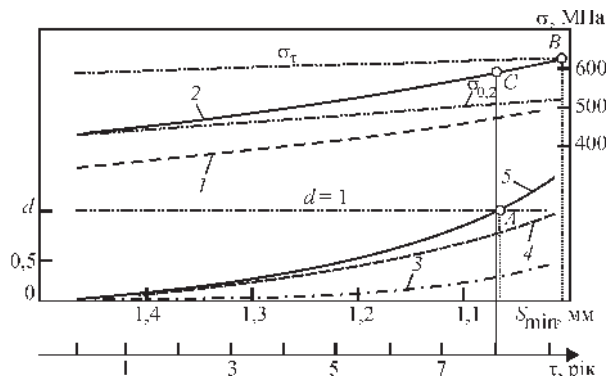


Рис. 8. Міцність подавального трубопроводу при одноразовому та малоцикловому навантаженні у залежності від товщини критично потоншеної ділянки  $s_{min}$  та тривалості корозійного процесу  $\tau$  на критично потоншій ділянці: 1 – максимальне робоче напруження  $\sigma_{max}$  ( $P = 1,6$  МПа); 2 – максимальне напруження  $\sigma_{max}$  під час ГВ ( $P = 2$  МПа); 3 – частка втомної пошкоджуваності  $d_f$ ; 4 – частка квазістатичної пошкоджуваності  $d_s$ ; 5 – сумарна пошкоджуваність при циклічному навантаженні  $d$

На рис. 8 представлено результати оцінки міцності подавального трубопроводу за наявності критично потоншеної зони з використанням рівнянь (1, 2).

При розрахунку квазістатичного пошкодження  $d_s$  в якості наявної пластичності  $e_f$  використовувалося значення рівномірної пластичної деформації  $e_p$ , зниження якої, як і збільшення величини накопиченої залишкової деформації  $e_r$ , приймалося пропорційним максимальному напруженню  $\sigma_{\max}$  в зоні критичного потоншення при проведенні гідравлічних випробувань.

Часовий інтервал зростання напружень під час періодичних гідравлічних випробувань ( $P_{\text{ГВ}} = 2$  МПа) на критично потоншених ділянках від  $\sigma_{0,2} = 430$  МПа (поява пластичних деформацій згідно з механічними випробуваннями) до  $\sigma_t$  (критерій статичної міцності) при середньому значенні швидкості корозії 0,05 мм/рік становить близько 9 років, що сумарно відповідає  $N \sim 100$  (цикл  $P_{\min} = 0$ ,  $P_{\max} = 1,6$  МПа), і  $N_{\text{ГВ}} \sim 10$  (цикл  $P_{\min} = 0$ ,  $P_{\max} = 2$  МПа).

Як бачимо, частка квазістатичного пошкодження  $d_s$  істотно (в три і більше разів залежно від товщини  $s_{\min}$ ) перевищує втомну пошкоджуваність  $d_f$ . Втомна складова пошкоджуваності при м'якому навантаженні залежить (2) від межі міцності  $\sigma_t$  (зростання  $\sigma_{0,2}$  забезпечує пружне деформування металу при  $P_p = 1,6$  МПа до руйнування (рис. 8, крива 1)), а квазістатична – від наявної пластичності  $e_f$ . Тому виявлені при проведенні механічних випробувань зміни характеристик міцності ( $\sigma_t$ ) і пластичності ( $\psi$ ,  $\delta_s$ ) сприятимуть зниженню частки втомної і збільшенню частки квазістатичної пошкоджуваності. Оскільки зміна пластичних властивостей металу є суттєвішою, а частка квазістатичної пошкоджуваності  $d_s$  – значнішою, зазначені зміни механічних властивостей сприятимуть зміщенню кривої сумарної пошкоджуваності (5 на рис. 8) в область більших товщин. Згідно з отриманими даними досягнення руйнування за критерієм малоциклової міцності випереджає в часі руйнування трубопроводу при одноразовому навантаженні (рис. 8, точки А та В), що може бути однією з причин низького виявлення критично потоншених ділянок під час гідравлічних випробувань, оскільки їх задовільний результат не виключає можливості руйнування протягом наступного опалювального сезону (рис. 8, точки А та С) внаслідок зростання сумарної пошкоджуваності  $d$  при значних коливаннях робочого тиску.

Видається, що можливим рішенням відновлення ефективності періодичних гідравлічних випробувань (виявлення та усунення основної кількості дефектів в міжопалювальний період) є виключення критично потоншених ділянок з експлуатації за рахунок збільшення тиску гідравлічних випробувань. Так, для досягнення цієї мети в наведено-

му вище прикладі тиск гідравлічних випробувань треба було б встановити на рівні  $1,7P_p$ . Підняття  $P_{\text{ГВ}}$  до проміжних значень ( $<1,7P_p$ ) імовірно зменшить загальну кількість наявних ділянок і, відповідно, відмов в опалювальний період, але продовжить непрогнозовані руйнування за критерієм малоциклової міцності на ділянках, що залишилися, у прискореному режимі. Вочевидь, призначення підвищеного тиску гідравлічних випробувань необхідно здійснювати диференційовано, у залежності від типорозміру трубопроводу, дійсних механічних властивостей конструкційного матеріалу, що можуть у цьому випадку визначатися за результатами вимірів твердості, та на основі моніторингу загального технічного стану. Обґрунтування пропонованого підходу можна було б здійснити на основі порівняльного аналізу результатів гідравлічних випробувань подавальних ( $P_{\text{ГВ}}/P_p = 1,25$ ) та зворотних ( $P_{\text{ГВ}}/P_p \approx 2 \dots 3$ ) трубопроводів, а також їх відмов в опалювальний період.

## Висновки

Найконсервативніші значення характеристик міцності та пластичності отримано при випробуванні зразків без деформування робочої частини та механічної обробки зовнішньої і внутрішньої поверхонь труби.

Механічні властивості металу труби з залишковою деформацією 0...3,5 %, визначені в кільцевому напрямку, є нижчими, ніж у поздовжньому: границя міцності – на 0...3 %, умовна границя плинності – на 0...15 %, відносне подовження – на 9...13 %, відносне звуження – на 13...28 %.

Накопичення пластичної деформації в діапазоні 0...3,5 % призводить до наближено лінійної зміни механічних властивостей металу його критично потоншених зон у кільцевому напрямку: збільшення границі міцності – на  $\sim 6$  % та умовної границі плинності – на  $\sim 22$  %; зменшення відносного подовження та звуження – на 16 та 13 %, відповідно.

Тенденції зміни механічних властивостей, розрахованих за вимірами твердості, у залежності від пластичної деформації 0...3,5 %, такі самі, як у випадку випробувань на розтяг. Розраховані показники є нижчими у випадку границі міцності на 3...6 %, умовної границі плинності – на 10...18 % та вищими у випадку відносного звуження на 27...40 %, ніж відповідні випробувальні значення у кільцевому напрямку.

Виявлені при проведенні механічних випробувань зміни механічних властивостей критично потоншених ділянок сприяють підвищенню схильності до малоциклового руйнування теплопроводу при більших залишкових товщинах.

Задовільний результат гідравлічних випробувань не виключає можливості руйнування теплопроводу протягом наступного опалювального

сезону внаслідок зростання малоциклової пошкоджуваності металу критично потоншених ділянок при значних коливаннях робочого тиску.

Надано пропозиції щодо визначення тиску гідравлічних випробувань теплопроводів.

### Список літератури

- (2003) ГКД 34.20.507 *Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила.*
- (1994) ГКД 34.20.504 *Теплові мережі. Інструкція з експлуатації.*
- (2007) Наказ МінПЕ № 71 *Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж.*
- (1998) ДНАОП 0.00-1.11 *Правила побудови і безпечної експлуатації трубопроводів пари та гарячої води.*
- (2017) Інструкція Київенерго № 29 *Проведення випробувань теплових мереж на гідравлічну щільність.*
- Дмитрієнко Р.І., Юхимець П.С., Тороп В.М. та ін. (2020) Пошкоджуваність та ефективність проведення гідравлічних випробувань теплових мереж міста Києва. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 1, 37–44. DOI:https://doi.org/10.37434/tdnk2020.01.04
- Стеклов О.І. (1998) Мониторинг и прогноз ресурса сварных конструкций с учетом их старения и коррозии. *Сб. трудов междунар. конф. «Сварка и родственные технологии – в XXI век». Киев, ИЭС им. Е.О. Патона*, сс.99–109.
- Плешивцев В.Г., Пак Ю.А., Филиппов Г.А. (2008) Факторы, снижающие конструктивную прочность металла труб, и перспективы создания новых трубных сталей для тепловых сетей. *3-я научно-практическая конференция «Тепловые сети. Современные практические решения»*. www.rosteplo.ru/Tech\_stat/stat\_shablon.php?id=2076
- Плешивцев В.Г., Филиппов Г.А., Пак Ю.А., Ливанова О.В. (2009) Влияние содержания углерода и напряженного состояния на скорость коррозии трубной стали в тепловых сетях. *Металлург*, 8, 22–25.
- (1991) ГОСТ 10704-91 *Трубы стальные электросварные прямые. Сортамент.*
- Юхимець П.С., Ниркова Л.І., Гопкало О.П. та ін. (2022) Особливості корозії трубопроводів теплових мереж зі сталі 17Г1С. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 1, 35–40.
- (1989) ГОСТ 19281-89 *Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия.*
- Гарбер К.Э. (2008) *Влияние напряжений на развитие коррозионных процессов в трубопроводах металлургического предприятия*. ОАО «Системэнерго». http://www.energsovet.ru/stat463.html
- (2009) ISO 6892-1 *Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature.*
- (2014) ISO 6506 *Metallic materials – Brinell hardness test – Part 1: Test method.*
- (2015) СОУ НАЕК 087:2015 *Методика визначення механічних властивостей металу за випробуваннями на твердість.*

17. Кобаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. (1985) *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность*. Москва, Машиностроение.

### References

- (2003) GKD 34.20.507. *Technical operation of power plants and networks. Rules* [in Ukrainian].
- (1994) GKD 34.20.504. *Heating networks. Operating manual* [in Ukrainian].
- (2007) *Ministry of Fuel and Energy, order No. 71. Rules for the technical operation of heating equipment and networks* [in Ukrainian].
- (1998) ДНАОП 0.00-1.11. *Rules for the construction and safe operation of steam and hot water pipelines* [in Ukrainian].
- (2017) Kyivenergo instruction No. 29. *Testing of heat networks for hydraulic leak tightness* [in Ukrainian].
- Dmytrienko, R.I., Yukhymets, P.S., Torop, V.M., Kysil, I.N., Yehorenko, V.N. (2020) Damageability and effectiveness of conducting hydraulic testing of heating systems of Kyiv city. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 1, 37–44 [in Ukrainian] DOI:https://doi.org/10.37434/tdnk2020.01.04.
- Steklov, O.I. (1998) Monitoring and prediction of the service life of welded structures taking into account their aging and corrosion. In: *Proc. of Int. Conf. on Welding and Related Technologies for 21<sup>st</sup> century (Kyiv, Ukraine, 24-27 November, 1998)*, PWI, 99–109.
- Pleshivtsev, V.G., Pak, Yu.A., Filippov, G.A. (2008) Factors that reduce the structural strength of pipe metal and the prospects for creating new pipe steels for heating networks. In: *Proc. of 3<sup>rd</sup> Sci.-Pract. Conf. on Heat Networks. Modern Practical Solutions*. www.rosteplo.ru/Tech\_stat/stat\_shablon.php?id=2076
- Pleshivtsev, V.G., Filippov, G.A., Pak, Yu.A., Livanova, O.V. (2009) Influence of carbon content and stress state on the corrosion rate of pipe steel in heat networks. *Metallurg*, 8, 22–25 [in Russian].
- (1991) GOST 10704 *Longitudinally welded steel pipes. Grades* [in Russian].
- (1989) GOST 19281 *High-strength rolled steel. General specifications* [in Russian].
- Yukhymets, P.S., Nyrkova, L.I., Gopkalo, O.P., Dmytrienko, R.I., Lytvynenko, A.Ye., Palienko, O.L. (2022) Features of corrosion of heat pipelines made of steel 17G1S. *Fiz.-Chimich. Mekhanika Materialiv*, 1, 35–40 [in Ukrainian].
- Garber, K.E. (2008) *Influence of stresses on the development of corrosion processes in pipelines of Sistemenergo Ltd. Metallurgical Enterprise* [in Russian]. http://www.energsovet.ru/stat463.html
- (2009) ISO 6892-1 *Tensile testing – Pt. 1: Method of test at room temperature.*
- (2014) ISO 6506 *Metallic materials – Brinell hardness test – Pt. 1: Test method.*
- (2015) SOU NAEK 087:2015. *Method of determination of metal mechanical properties by hardness measurement* [in Ukrainian].
- Kogaev, V.P., Makhutov, N.A., Gusenkov, A.P. (1985) *Calculations of machine parts and structures for strength and durability*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

## MECHANICAL PROPERTIES OF METAL OF CRITICALLY THINNED SECTIONS OF HEAT PIPELINES AND FEATURES OF THEIR DESTRUCTION

P.S. Yukhymets<sup>1</sup>, R.I. Dmytrienko<sup>1</sup>, O.L. Palienko<sup>1</sup>, V.M. Yehorenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua

<sup>2</sup>JV «Kyivteploenergo». 5, Ivan Franko sq., 01001, Kyiv, Ukraine. E-mail: yehorenko.vm@kte.kmda.gov.ua

A comparison of mechanical test results of a pipe metal was conducted depending on the type of sample, the accumulated residual strain and the method of its determination. A comparative assessment of heat pipe strength in the presence of a critically thinned area was performed based on the criteria of static and low-cycle strength. The obtained results proved that changes in the properties of strength and plasticity characteristics of critically thinned areas revealed during mechanical testing contribute to an increase in the probability of low-cycle destruction of the heat pipeline with larger residual thickness. Satisfactory result of periodic hydraulic tests does not exclude the possibility of heat pipeline destruction during the next heating season due to the increase in metal damage of critically thinned areas caused by significant fluctuations of operating pressure. Proposals are provided for determination of hydraulic test pressure of heat pipelines. 17 Ref., 2 Tabl., 8 Fig.

**Keywords:** heat pipeline, metal mechanical properties, low-cycle strength, hydraulic test

Надійшла до редакції 26.08.2022