

УДК 669.14:620.191.33

КОМПЛЕКСНІ ГІДРАВЛІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРНИХ ТРУБ З РІЗНИМИ ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В.Д. Макаренко¹,

д-р техн. наук, професор

В.І. Гоц²,

д-р техн. наук, професор

Ю.В. Макаренко³,

магістерка

О.Е. Чигиринець⁴,

д-р техн. наук, професор

В.І. Савенко²,

д-р техн. наук, професор

¹*Херсонський національний технічний університет, Україна*²*Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна*³*Медичний університет провінції Манітоба, м. Вінніпег, Канада*⁴*Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Україна*

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.112.239-247

Уперше проведені комплексні гідравлічні дослідження труб зварених по трьом різним схемам, що дозволило поєднувати труби різної в'язкості, що впливає на працездатність зварювальних з'єднань. Встановлено, що в дослідному інтервалі температур найбільшим спротивом зародженню руйнувань при ударному навантаженні володіє зона термічного впливу другого варіанту зварювання, а найменшим – першого варіанту. Статична міцність і пластичність зварюваних з'єднань труб другого і третього варіантів зварювання труб приблизно рівноцінні, а спротив зародженню руйнування зони термічного впливу у всіх варіантів майже однаковий і не нижче, чим для основного металу. Результати виконаних експериментальних досліджень свідчать про слабку кореляцію в області малих значень ударної в'язкості з характеристиками спротиву розповсюдженню руйнувань зварювальних з'єднань в умовах натурних випробувань труб. Характеристики, отримані в результаті випробувань повно товщинних зразків DWTT більш близькі, чим зразки Шарпі відповідають дійсним характеристикам працездатності зварювальних з'єднань в трубі. Зокрема, встановлено, що значення $A_3(-15^{\circ}\text{C})=0.75$ кДж і $A_p(-15^{\circ}\text{C})=0.45$ кДж забезпечують задовільний спротив зародженню і розповсюдженню руйнувань в зварювальних з'єднаннях (на рівні основного металу). Ці характеристики відповідають $KCU_{.60} = 0.5$ МДж/м², що близько до вимог по ударній в'язкості для основного металу (0.55 МДж/м²). Використання оптимальних конструктивних матеріалів, тобто матеріалів з високим спротивом водневого руйнуванню як основного металу, так і зон зварювальних з'єднань, піддаються термомодеформаційному циклу зварювання. Суттєвого ефекту можна добитися технологічними заходами, які дозволять знизити залишкові зварювальні напруження, а також значно знизити концентратори напружень за рахунок конструктивного покращення форми зварювального вузла. Застосування таких режимів термічної обробки, які відновлюють стійкість металу з крупнозернистою і дефектною структурою. Застосовувати для будівництва трубопроводів відповідального призначення удосконалені трубні сталі та зварювальні матеріали, наприклад сталі 06Г2БА і 08ХМЧА, які характеризуються підвищеною стійкістю проти водневого окрихнення та високою тріщиностійкістю в агресивних середовищах.

Ключові слова: труба, деформація, тріщина, пластична зона, тріщиностійкість.

Вступ. Відомо [1-20], що при аналізі фактичних руйнувань трубопроводів, осередок яких розташовувався в поздовжньому заводському шві труб, автори звертають увагу на те, що в багатьох випадках розповсюдження руйнування здійснюється по зварювальному шву труб. При експериментальних дослідженнях розповсюдження руйнування в якісно зварених швах прямошовних із СПК (труб контрольованої прокатки – сталь 06Г2БА) і низьколегованих нормалізованих (17Г1С-У) сталей не спостерігалось [16, 17] траєкторія руйнування відхилялася із металу заводського поздовжнього шва і із зони термічного впливу в основний метал. Все це дозволяє шляхом проведення серії натурних випробувань труб обґрунтовано підійти до питання встановлення вимог до ударної в'язкості металу шва в моменти відхилення траєкторії

руйнування від осі зварного з'єднання труб [1, 2, 4-6]. А тому для перевірки такої гіпотези була зроблена спроба при комплексному дослідженні працездатності експериментальних труб, які були зварені за трьома технологічними варіантами на різний рівень ударної в'язкості металу заводського поздовжнього шва.

Мета роботи – експериментальні дослідження працездатності зварювальних з'єднань з різною в'язкістю трубних сталей.

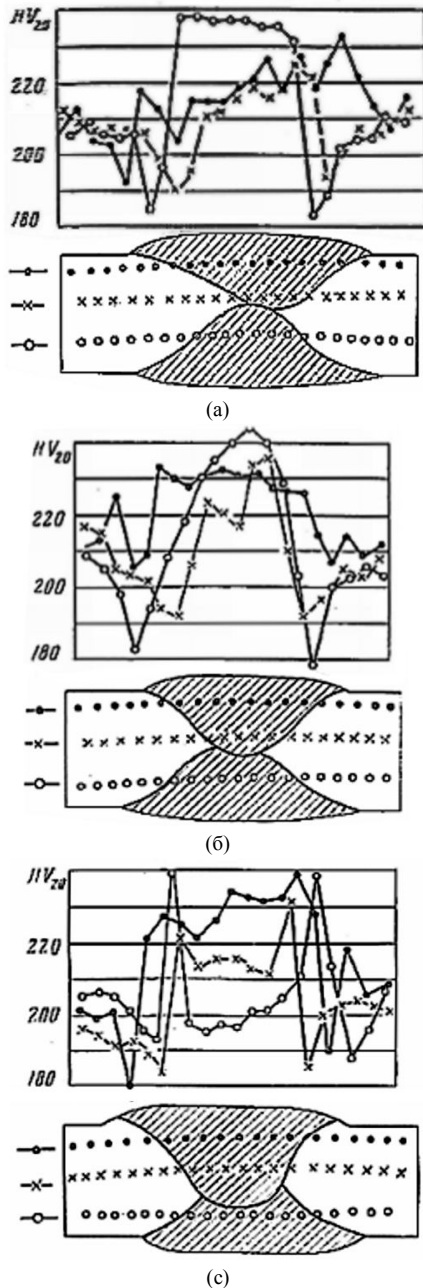


Рис. 1. Розподілення твердості по Віккерсу при навантаженні на інденторі 0.2 кН в зварних з'єднаннях експериментальних труб. Варіанти зварювання труб: (а) – I; (б) – II; (в) – III

Методика експериментальних досліджень та матеріали. Об'єктом експериментальних досліджень були трубні сталі, як традиційних марок 17Г1С, 09Г2С, які відносяться до класу міцності Х50-Х60, так і удосконалена сталь класу міцності Х70 – 06Г2БА, яка була економно модифікована сильним карбідотворюючим елементом - ніобієм. Крім того, вона в процесі виплавки і виготовлення труб піддавалася прискореному регульованому охолодженню та контрольованій прокатці на спеціальних прокатних станах, тобто використовувалася сучасна технологія (СКП +ПРО). Ці роботи на АК "Азовсталь" (м. Маріуполь) виконувалися під керівництвом крупного вченого-металурга, академіка НАНУ, доктора техн. наук, професора Призовського державного технічного університету Чигарьова В.В.

В експериментах використовували труби 1020x16мм на робочий тиск 10МПа в північному виконанні. На заводі були зварені 6 труб (по дві на кожний варіант) на середнє по трьом зразкам значення ударної в'язкості металу шва (KCU_{40} (I) = 0.215 МДж/м² – перший варіант; KCU_{40} (II) = 0.40 МДж/м² – другий варіант; KCU_{40} (III) = 1.25 МДж/м² – третій варіант при нормативному значенні для дослідних труб KCU_{40} 0.45 МДж/м²). Так як при зміні ударної в'язкості металу шва можливі зміни міцності і пластичних властивостей, а також холодостійкості проведено комплексне визначення характеристик працездатності по викладеній вище методиці. Випробування зразків зварюваного з'єднання на розтягування показали їх рівномірність основному металу. Зразки руйнувалися по основному металу при напруженнях 640-680 МПа при нормативній границі міцності 600 МПа. При випробуванні зразків із знятими підсиленнями на статичний згин дефектів не виявлено, тобто пластичність зварюваних з'єднань, їх спротив зародженню тріщин були задовільними.

Крім того, для проведення механічних досліджень на повітрі використовували установку моделі 1251 фірми "Інстрон" (Великобританія) а металографічні дослідження проводили на мікроскопі моделі "Джеол" (Японія).

Результати досліджень і їх обговорення. При аналізі макрошліфів зварювальних з'єднань були виявлені тверді і м'які прошарки (рис. 1). Коефіцієнти механічної неоднорідності на ділянці основний метал – м'який прошарок складали: K_M (I) = 1.15; K_M (II) =

1.17; $K_M(III) = 1.11$, а на ділянці м'який прошарок – твердий прошарок $K_T(I) = 1.31$; $K_T(II) = 1.38$; $K_T(III) = 1.33$. Найбільшу неоднорідність має зварювальне з'єднання, яке виконувалося за другим варіантом.

На рис. 2 показані діаграми зміни середньої руйнуючої деформації $\epsilon_{ср.р}$ і роботи зародження тріщини A_3 при випробуванні зразків на консольний згин. Встановлено, що пластичність внутрішніх швів, зварених першими, декілька вища, ніж зовнішніх. Аналогічний характер має залежність питомої роботи зародження тріщини A_3 по лінії сплавлення (див. рис. 2 (б)). Зварювальне з'єднання виконане по другому варіанту (див. рис. 2) має найбільш низьку пластичність, що пояснюється його більш високою механічною неоднорідністю в порівнянні з іншими варіантами і більш широким м'яким прошарком. Зменшення ширини м'якого прошарку спричиняє збільшення руйнівного напруження по лінії сплавлення, що пояснюється ефектом контактного зміцнення, оскільки в пластичну деформацію при меншій ширині м'якого прошарку в більшій мірі залучається більш міцний метал.

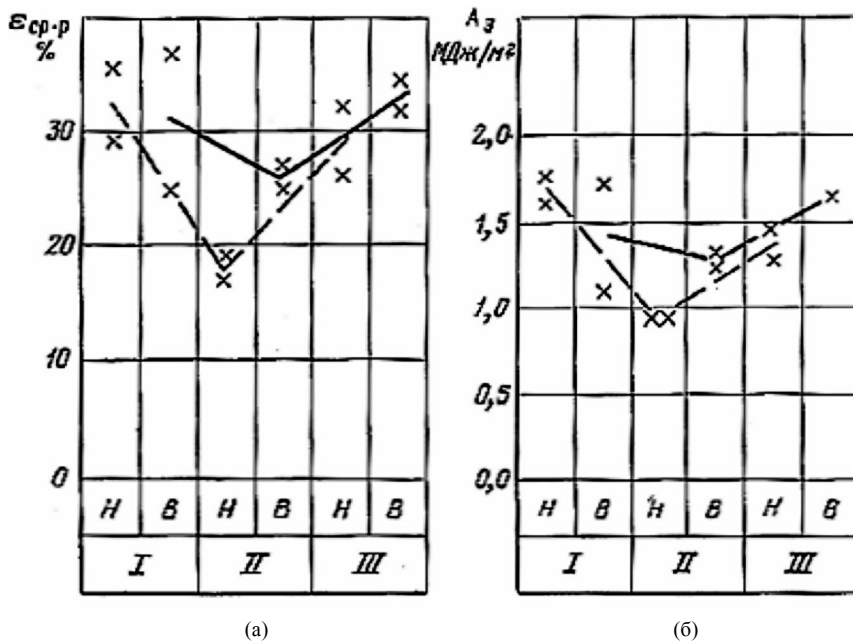


Рис. 2. Криві зміни пластичності (а) і роботи зародження тріщин (б) по лінії сплавлення $\epsilon_{ср.р}$ зварювальних з'єднань:

I - III - варіанти зварювання; II - зовнішній шов; В - внутрішній шов

Результати гідравлічних випробувань труб, зварених по варіантам II і III, наведені на рис. 3 і 4. Руйнівний тиск був $p_r(II) = 14.5$ МПа; $p_r(III) = 13.9$ МПа, а руйнівне напруження відповідно 630 і 625 МПа, що складає приблизно $1.05\sigma_B$ і $1.03\sigma_B$, тобто з'єднання рівномірне основному металу.

На рис. 4 наведені залежності тангенціальних пластичних деформацій в функції від відстані до центру шва. Для порівняння показані криві деформацій на внутрішній поверхні в перерізах з підсиленням і в перерізах зі знятим підсиленням. Видно, що наявність підсилень підвищує концентрацію деформацій по лінії сплавлення внутрішніх швів в 2 рази, максимальна деформація по лінії сплавлення внутрішніх швів для двох варіантів зварювання складає $\epsilon_{max}(II) = 6.2\%$; $\epsilon_{max}(III) = 6.5\%$, а середня руйнівна деформація згідно рис. 4 (а) складає 4%. Коefіцієнт концентрації деформацій в цих випадках складає $\alpha'_\epsilon(II) = 1.55$, $\alpha'_\epsilon(III) = 1.63$. Гранична пластичність внутрішніх швів розглянутих зварювальних з'єднань (див. рис. 2 (а)) складає $\epsilon_{ср.р}(II) = 26\%$, $\epsilon_{ср.р}(III) = 33\%$. Отже, коefіцієнт запасу по пластичності зварювального з'єднання в дослідних трубах $n'_\epsilon(II) = \epsilon_{ср.р} / (\alpha'_\epsilon \cdot \epsilon_p) = 4.1$ і $n'_\epsilon(III) = 5.1$.

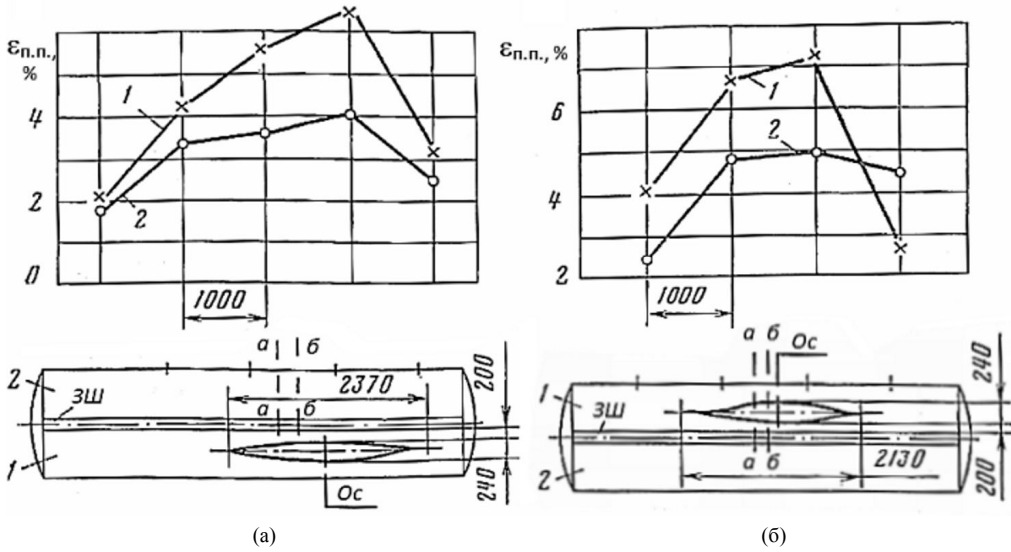


Рис. 3. Випробування труб гідравлічним тиском до руйнування, зварених по варіантам II (а) і III (б): $\epsilon_{п.п.}$ - відносне подовження на півпериметрів; 1, 2 - напівтруби; ЗШ - зварювальний шов ; Ос - осередок тріщини

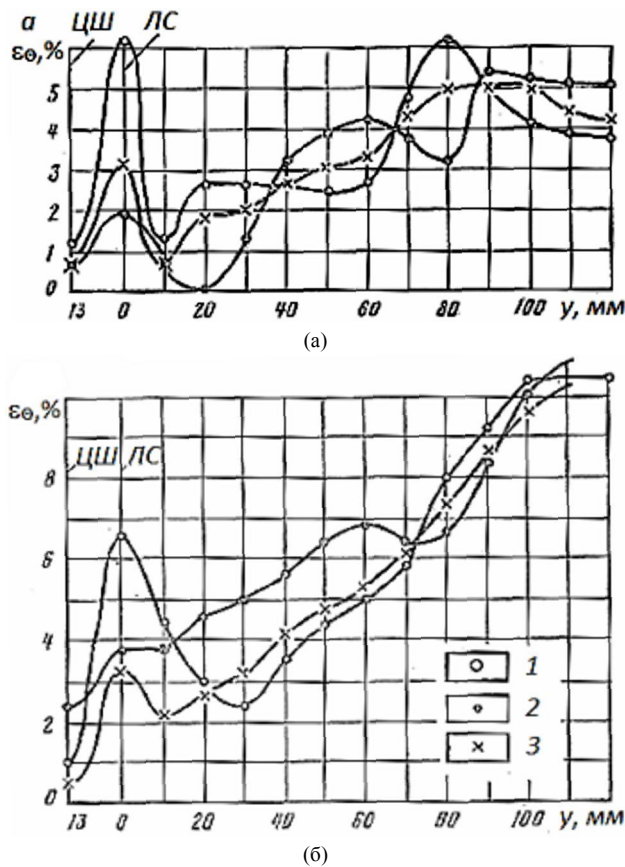


Рис. 4. Розподілення тангенціальних пластичних деформацій в поперечних перетинах поздовжніх швів після гідравлічних випробувань труб, зварених по варіантам II (а) і III (б): 1 - на внутрішній поверхні в перерізах а - а з посиленнями; 2 - то же в перерізах б - б із знятими підсиленнями; ЦШ - центр шва; ЛС - лінія сплавлення (розміщення перерізів - див. рис. 3)

Отримані результати гідравлічних випробувань експериментальних труб характеризують задовільну працездатність зварювального з'єднання при статичних навантаженнях, при цьому працездатність зварювального з'єднання варіанту III помітно вища працездатності зварювального з'єднання варіанту II. Ударна в'язкість KCV зварювальних з'єднань експериментальних труб (рис. 5), особливо металу шва, значно поступається KCV основного металу. Згідно вимог технічних умов ударна в'язкість KCV для основного металу при реплантованій температурі -15°C повинна бути не менше 0.8 МДж/м^2 (фактично в дослідних трубах $KCV_{-15} = 2.2 \text{ МДж/м}^2$). На рис. 5 показано, що тільки метал зони термічного впливу зварювального з'єднання труби варіанту II, маючи $KCV_{-15} = 0.83 \text{ МДж/м}^2$, задовольняє вимогам норм на основний метал. В усіх інших випадках ударна в'язкість помітно нижча, особливо для металу швів. Із отриманих даних слідує, що при оцінці спротиву розповсюдженню руйнувань в зварювальному з'єднанні по величині KCV_{-15} перевагу слід віддавати другому варіанту зварювання.

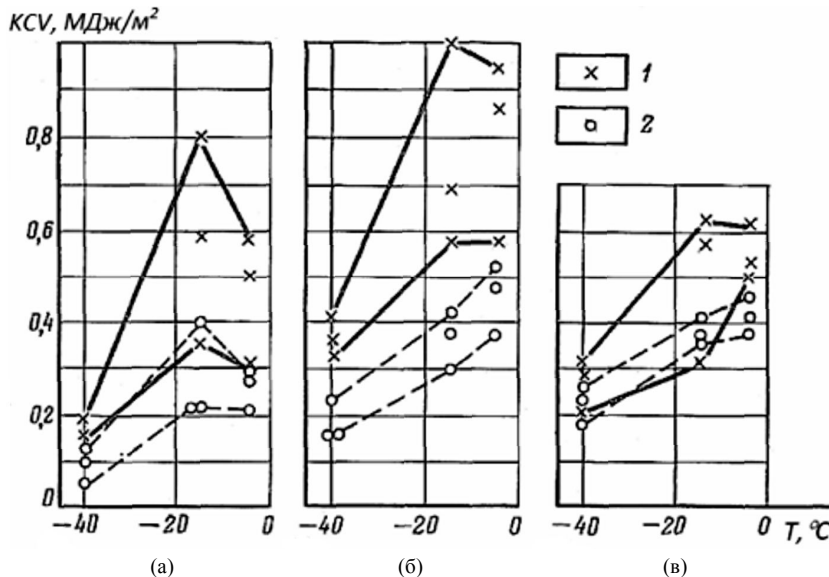


Рис. 5. Залежність ударної в'язкості від температури випробування зразків Шарпі із зварювальних з'єднань експериментальних труб. Варіанти зварювання: (а) – I; (б) – II; (в) – III: 1 – зона термічного впливу; 2 – центр шва

Криві спротиву зародженню і розповсюдженню руйнувань в зварювальних з'єднаннях по даним випробувань зразків DWTT показані на рис. 6. В дослідному діапазоні температур найбільшим спротивом зародженню руйнувань при ударному навантаженні володіє зона термічного впливу другого варіанту зварювання (рис. 6 (а)), а найменшим – першого варіанту. Аналогічна залежність спостерігається і для металу шва (див. рис. 6 (б)). Спротив розповсюдженню руйнування на зразках DWTT знижується більш різко в залежності від температури випробувань, чим на зразках Шарпі (рис. 6 (в), (г)). По зоні термічного впливу більш високим спротивом володіє зварювальне з'єднання другого варіанту, хоча при -15°C відбувається різке зниження A_3 . Величина A_p для металу шва при температурі -15°C змінюється від 0.08 до 0.4 кДж. Найбільш різким зниженням спротиву розповсюдження руйнування характеризується перший варіант.

Отримані при натурних випробуваннях характеристики спротиву розповсюдженню руйнувань зведені в табл. 1.

З табл. 1 видно, що характеристики спротиву розповсюдженню руйнування для металу зони термічного впливу при натурних випробуваннях труб, не дивлячись на різні KCV_{-15} і A_p (-15°C) практично однакові у всіх варіантах. Встановлено, що швидкість в'язкої тріщини при розповсюдженні по зоні термічного впливу змінюється в межах 150-175 м/с; максимальне значення пластичного розкриття 24-30мм. Таким же спротивом розповсюдженню руйнування володіє і основний метал. При чому значення A_3 (-15°C) в межах 0.65-0.75 кДж і A_p (-15°C) в

межах 0.2-1.3 кДж забезпечили однаковий з основним металом спротив руйнуванню зони термічного впливу.

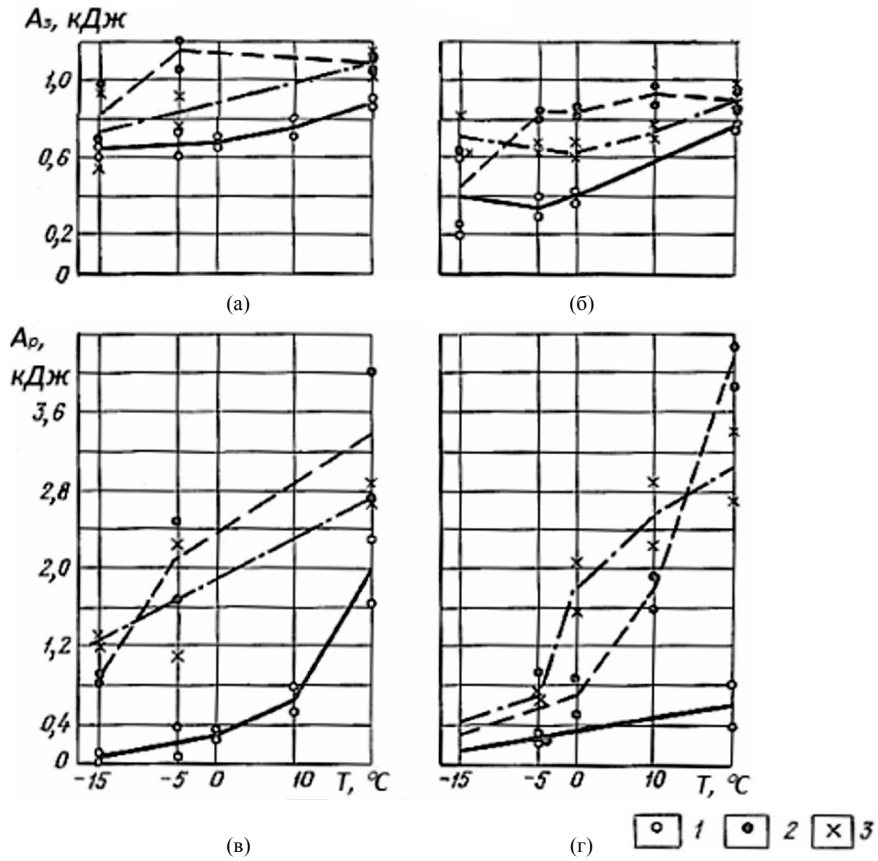


Рис. 6. Зміни роботи зародження A_z і розповсюдження руйнувань A_p в залежності від температури випробування зразків DWTT із зварювальних з'єднань експериментальних труб: а, в – надрізи по зоні термічного впливу; б, г – по центру зварювального шва. Варіанти зварювання труб: 1 – I, 2 – II, 3 – III

Таблиця 1

Результати натурних пневматичних випробувань експериментальних труб діаметром 1020 мм із сталі СКП

σ_{P}^{CP} , МПа	Об'єкт аналізу (варіант зварювання труб)	Характеристики спротиву розповсюдженню руйнування				
		Швидкість тріщини, м/с		$\delta_{ПЛ}^{max}$, мм	Температура, °С	
		В'язкий V_{min}	Крихкий V_{max}		Максимального спротиву T_m	Крихко-в'язкого переходу T_{50}
285	Зона термічного впливу (I)	160	-	30	-15	-70
345	То же (II)	170	-	25	-18	-80
290	То же (III)	167	-	26	+5	-50
345	Метал шва (I)	-	570	9	+8	+6
395	То же (II)	-	520	15	-14	-16
400	Зона термічного впливу (III)	180	-	30	-7	-60
320	Основний метал	175	-	31	-20	-65

Результати виконаних експериментальних досліджень свідчать про слабку кореляцію в області малих значень ударної в'язкості з характеристиками спротиву розповсюдженню руйнувань зварювальних з'єднань в умовах натурних випробувань труб. Характеристики, отримані в результаті випробувань повно товщинних зразків DWTT більш близькі, чим зразки Шарпі відповідають дійсним характеристикам працездатності зварювальних з'єднань в трубі. Зокрема, встановлено, що значення $A_3(-15^{\circ}\text{C}) = 0.75$ кДж і $A_p(-15^{\circ}\text{C}) = 0.45$ кДж забезпечують задовільний спротив зародженню і розповсюдженню руйнувань в зварювальних з'єднаннях (на рівні основного металу). Ці характеристики відповідають $KCU_{.60} = 0.5$ МДж/м², що близько до вимог по ударній в'язкості для основного металу (0.55 МДж/м²).

Отже, можна вважати, що для труб із СКП великої в'язкості рівень ударної в'язкості зварювальних з'єднань повинен приближатися до ударної в'язкості основного металу. Для сталей середньої і низької в'язкості це співвідношення може бути іншим.

Висновки

1. Уперше проведені комплексні гідравлічні дослідження труб зварених по трьом різним схемам, що дозволило поєднувати труби різної в'язкості, що впливає на працездатність зварювальних з'єднань.

2. Встановлено, що в дослідному інтервалі температур найбільший спротив зародженню руйнувань при ударному навантаженні має зона термічного впливу другого варіанту зварювання, а найменший – першого варіанту.

3. Статична міцність і пластичність зварюваних з'єднань труб другого і третього варіантів зварювання труб приблизно рівноцінні, а спротив зародженню руйнування зони термічного впливу у всіх варіантів майже однаковий і не нижче, чим для основного металу.

4. Результати виконаних експериментальних досліджень свідчать про слабку кореляцію в області малих значень ударної в'язкості з характеристиками спротиву розповсюдженню руйнувань зварювальних з'єднань в умовах натурних випробувань труб. Характеристики, отримані в результаті випробувань повно товщинних зразків DWTT більш близькі, чим зразки Шарпі відповідають дійсним характеристикам працездатності зварювальних з'єднань в трубі. Зокрема, встановлено, що значення $A_3(-15^{\circ}\text{C}) = 0.75$ кДж і $A_p(-15^{\circ}\text{C}) = 0.45$ кДж забезпечують задовільний спротив зародженню і розповсюдженню руйнувань в зварювальних з'єднаннях (на рівні основного металу). Ці характеристики відповідають $KCU_{.60} = 0.5$ МДж/м², що близько до вимог по ударній в'язкості для основного металу (0.55 МДж/м²).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Савенко В.І., Владимиров О.В., Макаренко Ю.В. Експериментальні дослідження кінетики росту тріщин та несучої здатності трубних сталей підземних систем водовідведення // Опір матеріалів і теорія споруд: Вип. №110.- 2023, С. 469-482.
2. Макаренко Ю.В., Савенко В.І., Горлач О.М., Задорожнікова О.В., Чигиринець О.Е., Победа С.С. Дослідження кінетики росту тріщин під дією статичних і динамічних навантажень трубних сталей в корозійно-агресивному середовищі NACE // Опір матеріалів і теорія споруд: Вип. №110.- 2023, С.520-532.
3. NACEStandardTM01-77(90). Standard Test Method. Laboratory Testing of Metals Resistance to Sulfide Stress Cracking in H2S Environments // NACE. – Houston. P.O. BOX 218340.1990.-22 p.
4. Okada T., Hattori S. Relation Between Concentration of Salt Water and Corrosion Fatigue Strength on 0.37 Percent Carbon Structural Steel, Fukui University, Японія: Теоретические основы инженерных расчетов (Труды Американского общества инженеров-механиков); изд-во Мир, 1985, №3, S.98-107.
5. Макаренко В.Д., Крижанівський Є.І., Чернов В.Ю. Проблеми корозійної стійкості промислових трубопроводів// Нафтова і газова промисловість. -2002.-№6.-С.42-44
6. Самойленко М.І., Функціональна надійність трубопроводних транспортних систем// Харків: ХНАМП. – 2009.-184с
7. Насоніна Н.Г., Антоненко С.Є. Аналіз пошкодженості водопровідних і каналізаційних мереж// Сучасне промислове та цивільне будівництво. -2019.-Том15.-№1.-С23-34
8. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Аргатенко Т.В. і ін. Дослідження аварійних трубопроводів // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, вип. 42. -2023.-С.49-58
9. Брису А., Лафранс М., Прову І. Розробка нових сортів сталі с підвищеними характеристиками для транспорту кислого газу і нафти// Нефтегаз-Франція –ЮзичорАсье, 1986. -19с
10. Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної трубної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами / О. Чапля, О. Радкевич, О. П'ясецький, Я. Спектор//Машинознавство. -1999.-№8.- С52-56
11. Основні закономірності наводнення та поверхневого пухиріння трубної сталі в сірководневих середовищах / О. Радкевич, Г. Чумало, І. Доминюк і ін. // Фіз.-хім. механікаматеріалів. - 2004. - Спец. вип. № 4, т. 1. - С. 446-449.
12. Tyson W.R. Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Dislocation Interactions // Corrosion. - 1980. Vol. 36, No. 8. - Pp. 441-443.
13. Ford F.P. Stress Corrosion Cracking in Advances in Corrosions Science-1, Ed., R.N.Parkins, Applied Science Publishers, 2002.

14. Кавакубо Т, Хісида М. Розрахунок прискороного навколишнім середовищем росту тріщини для неіржавіючої сталі у воді високої температури на основі механіки пружно-пластичного руйнування // Journal of Engineering Materials and Technology, 1995, Vol.107, p.240-245.
15. Макаренко В.Д. Експериментальні випробування трубопроводів // Ніжин: НДУ ім.Миколи Гоголя, 2020. -543 с.
16. Макаренко В.Д., Стогній О.В., Гоц В.І. і ін. Полігонні випробування газопроводів. Монографія// Ніжин: НДУ ім. М.Гоголя. -2023. – 160 с.
17. Макаренко В.Д., Білик С.І., Чигиринець О.Е. і ін. Кінетика тріщиноутворення в сталевих конструкціях // Київ: НУБіП України. -2023. -248 с.
18. Мешков Ю.Я. Физические основы разрушения стальных конструкций //Киев: Наукова думка. -1981. -284с
19. Макаренко В.Д., Стогній О.В.,Гоц В.І. і ін. Натурні випробування трубопроводів. Монографія// Ніжин: НДУ ім. М.Гоголя. -2023. – 154 с.
20. Влияние водорода на хрупкость конструкционных сталей и сварных соединений /И.К. Походня, В.И. Швачко, С.А. Котречко и др. // Автомат сварка. – 1989. - №5. – С.1 – 4.

REFERENCES

1. Makarenko V.D., Hots V.I., Savenko V.I., Vladymyrov O.V., Makarenko Yu.V. Eksperymentalni doslidzhennia kinetyky rostu trishchyn ta nesuchoi zdatnosti trubnykh staley pidzemnykh system vodovidvedennia (Experimental studies of crack growth kinetics and bearing capacity of pipe steels of underground drainage systems) // Opir materialiv i teoriia sporud: Vyp. №110.-2023, S. 469-482.
2. Makarenko Y.V., Savenko V.I., Gorchach O.M., Zadorozhnikova O.V., Chyhyrynets O.E., Pobeda S.S. Doslidzhenniakinetyky rostu trishchyn pid dieiu statychnykh i navantazhen trubnykh staley v koroziiino-ahresyvnomu seredovyschchi (Study of the kinetics of crack growth under the action of static and loading of pipe steels in corrosion - aggressive environment) // NASE//Opir materialiv i teoriia sporud: Vyp. №110.-2023, S.520-532.
3. NACE Standard TM01-77(90). Standard Test Method. Laboratory Testing of Metals Resistance to Sulfide Stress Cracking in H₂S Environments // NACE. -Houston. P.O. BOX 218340.1990.-22 p.
4. Okada T., Hattori S. Relation Between Concentration of Salt Water and Corrosion Fatigue Strength on 0.37 Percent Carbon Structural Steel, Fukui University, Japan: Theoretical Foundations of Engineering Calculations (Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers); Publishing house Mir, 1985, No. 3, S.98-107.
5. Makarenko V.D., Kryzhanivskiy E.I., Chernov V.Yu. Problemy koroziiinoi stiiikosti promyslovyykh truboprovodiv (Problems of corrosion resistance of industrial pipelines) // Naftova i hazova promyslovist. -2002. -№6. -S.42-44
6. Samoilenko M.I. Funktsionalna nadiinist truboprovodnykh transportnykh system (Functional reliability of pipeline transport systems) // Kharkiv: KhNAMP. – 2009.-184s
7. Nasonina N.G, Antonenko S.E. Analiz poshkodzhenosti vodoprovodnykh i kanalizatsiinykh mrezh (Analysis of the damage to water supply and sewerage lines) // Suchasne promyslove ta tsyvilne budivnytstvo. -2019.-Tom15.-№1.-S.23-34
8. Makarenko V.D., Gots V.I., Argatenko T.V. Doslidzhennia avariinykh truboprovodiv (Research of emergency pipelines) // Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky, vyp. 42. -2023.-S.49-58
9. Brydu A., Lafrance M., Provu I. Rozrobka novykh sortiv staly z pidvyschenymy kharakterystykamy dlia transportuvannia kyslotnoho hazu i nafty (Development of new grades of steel with improved characteristics for the transport of acid gas and oil) //Neftekhaz-Frantsyia –YuzychorAse, 1986. -19s
10. O. Chaplya, O. Radkevich, O. P'yasetsky, Y. Spektor Porivnialnyi analiz koroziiino-mekhanichnykh vlastyivostei vitchyznianoї trubnoi stali 20YuCh z inozemnymy analogamy (Routine analysis of the corrosion-mechanical properties of 20YuCh laminated pipe steel with foreign analogues) //Mashynoznavstvo. -1999.-№8.- S52-56
11. Radkevich O., Chumalo G., Dominyuk I. Osnovnyzakonomirnosti navodniuvannia ta poverkhnivoho pukhyrinna trubnoi stali v sirkovodnykh seredovyschchakh (Fundamentals of the regularity of flooding and surface fluff of pipe steel in deep-water environments) // Fiz.- khim. mexanikamaterialiv. - 2004. - Spets. vyp. № 4, t. 1. - S. 446-449.
12. Tyson W.R. HydrogenEmbrittlementandHydrogenDislocationInteractions // Corrosion. - 1980. Vol. 36, No. 8. - Pp. 441-443.
13. Ford F.P. Stress Corrosion Cracking in Advances in Corrosions Science-1, Ed., R.N.Parkins, Applied Science Publishers, 2002.
14. Kawakubo T, Hishida M. Rozrakhunok pryskorenoho navkolyshnim seredovyschhem rostu trishchyny dlia neirzhaviiuchoi stali u vodi vysokoi temperatury na osnovi mexaniky pruzhno-plastychnoho ruinuvannia (Restoration of medium-accelerated crack growth for stainless steel at high temperature water based on the mechanics of spring-plastic collapse) // Journal of Engineering Materials and Technology, 1995, Vol.107,p.240-245.
15. Makarenko V.D. Eksperymentalni vyprobuvannia truboprovodiv (Experimental testing of pipelines) // Nizhyn:NDU im.Mykoly Hoholia, 2020.-543s.
16. Makarenko V.D., Stognij O.V., Gots V.I. Polihonni vyprobuvannia hazoprovodiv (Testing sites for gas pipelines) Monohrafiia// Nizhyn: NDU im. M.Hoholia. -2023. – 160s
17. Makarenko V.D., Bilik S.I., Chigirinet O.E. Kinetyka trishchyno utvorennia v stalevykh konstruktssiakh (Kinetics of crack formation in steel structures) // Kyiv:NUBiP Ukrainy. -2023. -248s
18. Meshkov Yu.Ya. Fizychni osnovy ruinuvannia stalevykh konstruktssii (Physical principles of destruction of steel structures) //Kyiv: Naukova dumka. -1981.-284s
19. Makarenko V.D., Stognij O.V., Gots V.I. Naturni vyprobuvannia truboprovodiv (Field tests of pipelines) Monohrafiia// Nizhyn: NDU im. M.Hoholia. -2023. – 154s
20. I.K. Pokhodnya, V.I. Shvachko, S.A. Kotrечko Vplyv vodniu na krykhkist konstruktssiinykh staley ta zvarnykh ziednan (The influence of hydrogen on the brittleness of structural steels and welded joints) // Avtomat zvariuvannia. - 1989. - №5. - S.1 - 4.

Makarenko V.D., Gots V.I., Makarenko Y.V., Chygyrynets' O.E., Savenko V.I.

COMPLEX HYDRAULIC STUDIES OF WELDED PIPES WITH DIFFERENT VISCO-PLASTIC CHARACTERISTICS

For the first time, complex hydraulic studies of pipes welded according to three different schemes were carried out, which made it possible to combine pipes of different viscosities, which affects the performance of welding joints. It was found that in the experimental temperature range, the zone of thermal influence of the second welding variant has the greatest resistance to the initiation of fractures under shock loading, and the lowest - the first variant. The static strength and ductility of the welded pipe joints of the second and third pipe welding options are approximately equivalent, and the resistance to the initiation of the thermally affected zone in all options is almost the same and not lower than that of the base metal. The results of the performed experimental studies indicate a weak correlation in the area of small values of impact viscosity with the characteristics of resistance to fracture propagation of welding joints in the conditions of full-scale pipe tests. The characteristics obtained from tests of full-thickness DWTT specimens are closer than the Charpy specimens to the actual performance characteristics of the weld joints in the pipe. In particular, it was established that the values of $A_z (-15^{\circ}\text{C})=0.75$ kJ and $A_T (-15^{\circ}\text{C})=0.45$ kJ provide satisfactory resistance to the initiation and propagation of fractures in welding joints (at the base metal level). These characteristics correspond to $KSU_{.60} = 0.5$ MJ/m², which is close to the impact toughness requirements for the base metal (0.55 MJ/m²). The use of optimal structural materials, that is, materials with high resistance to hydrogen destruction of both the base metal and zones of welding joints subjected to a thermo-deformation cycle of welding. A significant effect can be achieved by technological measures that will reduce residual welding stresses, as well as significantly reduce stress concentrators due to structural improvement of the shape of the welding unit. Application of such heat treatment regimes that restore the stability of metal with a coarse-grained and defective structure. Use improved pipe steels and welding materials, such as 06G2BA and 08 KhMCHA steels, which are characterized by increased resistance to hydrogen embrittlement and high crack resistance in aggressive environments, for the construction of pipelines of responsible purpose.

Key words: pipe, deformation, crack, plastic zone, crack resistance.

УДК 669.14:620.191.33

Макаренко В.Д., Гоц В.І., Макаренко Ю.В., Чигиринець О.Е., Савенко В.І. Комплексні гідрравлічні дослідження зварних труб з різними вязко-пластичними характеристиками // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 112. – С. 239-247.

Табл. 1. Іл. 6. Бібліогр. 20 назв.

UDC 669.14:620.191.33

Makarenko V.D., Gots V.I., Makarenko Y.V., Chygyrynets' O.E., Savenko V.I. Complex hydraulic studies of welded pipes with different visco-plastic characteristics // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA, 2024. – Issue 2 – P. 239-247.

Table 1. Fig. 6. Ref. 20.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор Херсонський національний технічний університет Макаренко Валерій Дмитрович

Тел.: +38(066) 747-67-90

E-mail: green555tree@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9178-9657>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельних конструкцій і виробів Київського національного університету будівництва і архітектури ГОЦ Володимир Іванович

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38(044) 248-30-16

E-mail: gots.vi@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-1609>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): магістерка університету Манітоби (м. Вінніпег, Канада) Макаренко Юлія Валеріївна

Тел.: +38(066) 747-67-90

E-mail: green555tree@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9113-428X>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор хімічних наук, професор кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Чигиринець Олена Едуардівна

Адреса робоча: КПІ ім. Ігоря Сікорського, пр. Берестейський, 37, корп. 4, Київ 03056

Тел.: +38(044)-204-83-89

E-mail: o.chygyrynets@kpi.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2506-7020>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор кафедри організації і управління будівництвом Київського національного університету будівництва і архітектури Савенко Володимир Іванович

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, просп. Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел.: +38(097)-970-66-59

E-mail: savenkoknuba@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1490-6730>