

В.Д. Макаренко¹,

докт. техн. наук, професор

ORCID: 0000-0001-6668-3957

В.І. Гоц²,

докт. техн. наук, професор

ORCID: 0000-0001-7702-1609

О.Ю. Бердник²,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-5321-3518

Н.О. Амеліна²,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0000-0002-3076-8120

І.С. Ясенова³,

канд. техн. наук, доцент

ORCID: 0009-0006-0011-2100

¹Херсонський національний технічний університет, м. Херсон

²Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

³Університет державної фіскальної служби України, м. Ірпінь

ВПЛИВ ВОДНЮ НА СПРОТИВ УТВОРЕННЮ ТРІЩИН В ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ТРУБОПРОВІДІВ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Існуючі науково-практичні дослідження впливу водню на параметри тріщиностійкості характеризуються невизначеністю і протиріччям, відсутністю чітких уявлень про механізм зародження і розповсюдження холодних тріщин, а отже немає виважених підходів стосовно протидії тріщиноутворенню в процесі тривалої експлуатації трубопроводів, а тому потрібні додаткові дослідження. Встановлено, що зі збільшенням вмісту дифузійного водню в наплавленому металі різко зменшується спротив його крихкого руйнування. Так, при вмісті водню $8,1 \text{ см}^3/100\text{г}$ в наплавленому металі і швидкості охолодження $W_{\text{охл}} = 4,0 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$ робота зародження тріщини $A_{\text{зм}} = 1,5 \text{ Дж}$, а при $1,5 \text{ см}^3/100\text{г}$ величина $A_{\text{зм}}$ зростає до $17,6 \text{ Дж}$, тобто більш ніж в 11 раз. Коли вміст водню вище $5,0 \text{ см}^3/100\text{г}$, а $W_{\text{охл}} = 55 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$, то значення $A_{\text{зм}}$ практично рівне нулю. Показано, що зі збільшенням вмісту водню в зварному шві зменшується також робота розповсюдження тріщини $A_{\text{рм}}$. Так, при концентрації водню $1,0 \text{ см}^3/100\text{г}$ для зварного з'єднання на сталях 09Г2С і 17Г1С при $W_{\text{охл}} = 4,0 \text{ }^{\circ}\text{C/100г}$ величина $A_{\text{рм}} = 48,5 \text{ Дж/см}^2$, а при збільшенні його вмісту до $8,0 \text{ см}^3/100\text{г}$ робота $A_{\text{рм}}$ знижується до $18,5 \text{ Дж/см}^2$, тобто в 2,7 рази. Зниження температури повітря при зварці до $-30 \dots -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і підвищення концентрації розчиненого водню в зварному шві до $5-8 \text{ см}^3/100\text{г}$ призводять до збільшення критичної температури крихкості приблизно на $40-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Пластичні деформації неминуче виникаючі в зварювальних з'єднаннях і конструкціях, по своїй природі виникнення в процесі технологічного циклу виготовлення і експлуатації зварної конструкції можна розділити на наступні групи: а) вихідні деформації в основному металі, які залежать від способу отримання і обробки метала, ливаркою, порошковою

металургією, тиском (прокатка, штампівка, ковка); б) деформації, виникаючі при заготовочних операціях і зборці, різка, правка, згин, вальцівка, закріплення на збиральних пристосуваннях; в) зварювальні деформації, виникаючі внаслідок термдеформаційного циклу зварювання; г) технологічні деформації; д) експлуатаційні деформації, які можуть мати місце в процесі експлуатації в результаті місцевих перевантажень, втрати стійкості та ін.

Ключові слова: *водень, тріщини, крихкість, руйнування, надійність, деградація.*

Вступ. Протягом останніх років безперервно зростають продуктивність і протяжність побудованих трубопроводів, збільшився діаметр труб і робочий тиск. В той же час теоретичні і лабораторні дослідження не завжди з достатньою повнотою відповідають на питання, пов'язані безпосередньо із забезпеченням довговічності і безаварійної працездатності. Вірогідно, що в лабораторних умовах підприємств чи наукових закладів важко відтворити і урахувати всі фактори, які характеризують зростання і розповсюдження руйнування в реально діючому трубопроводі. Тому дані лабораторних досліджень потрібно перевіряти і обов'язково уточнювати по результатах пневматичних випробувань довгомірних трубних секцій, тобто в теперішній час гостро назріла необхідність поєднання лабораторних і натурних випробувань труб водопровідних мереж. Такі випробування не є масовими, але в результаті їх виконання отримують важливу інформацію стосовно поведінки і властивостей металу в умовах навантаження і експлуатації найбільш наближених до експлуатаційних.

Аналіз досліджень і публікацій. На основі аналізу літературних даних [1-8, 10, 12-18] і результатів власних досліджень авторів статті встановлено, що основними причинами руйнування промислових трубопроводів, які експлуатуються в жорстких природно-кліматичних і геолого-інженерних умовах нафтогазових родовищ є зниження фізико-механічних властивостей трубних сталей під впливом мінусових температур навколишнього середовища, утворення холодних тріщин в зоні термічного впливу зварного з'єднання у зв'язку з підвищеною схильністю її до водневого окрихчення, корозійносульфідне розтріскування під впливом статичної водневої утомленості металу трубопровода, недопустимі дефекти зварних швів і з'єднань та ін. Багато авторів [9, 11, 13-18] наголошує щодо впливу холодних тріщин, які утворюються, як правило, в навколишній зоні зварних швів, на працездатність і надійність трубопроводів при експлуатації в умовах мінусових температур. Причому найбільш небезпечним місцем утворення холодних тріщин є кореневий шов.

Про вплив мінусових температур повітря при зварюванні трубопроводів на динаміку утворення тріщин і пор, спричинених воднем, відомо з багатьох публікацій [1-6, 10, 12-14]. Ймовірність утворення тріщин при цьому підвищується із зростанням залишкових напружень і збільшенням вмісту водню в металі. Таким чином, узагальнення причин руйнування зварних з'єднань трубопроводів дозволило виділити головну із них – утворення холодних тріщин в зоні термічного впливу у зв'язку з підвищеною схильністю до крихких руйнувань під дією знакозмінних навантажень з урахуванням водневої деградації металу. Можна вважати, що основним чинником, який впливає на процес інкубаційного зародження, уповільненого росту і розповсюдження холодних тріщин при зварці

трубопроводу в умовах низьких (мінусових) температур повітря - є водень, який негативно впливає на механічні властивості та тріщиностійкість металу. Існуючі науково-практичні дослідження впливу водню на ці параметри характеризуються невизначеністю і протиріччям, відсутністю чітких уявлень про механізм зародження і розповсюдження холодних тріщин, а отже нема виважених підходів стосовно протидії тріщиноутворенню в процесі тривалої експлуатації трубопроводів, а тому потрібні додаткові дослідження.

Постановка завдання. Ціллю даної роботи є експериментальне дослідження впливу водню на зародження і ріст тріщин в зварних з'єднаннях сталей, які використовуються для будівництва і експлуатації трубопровідних конструкцій в жорстких природньо-кліматичних і інженерних умовах.

Основна частина. Об'єктом дослідження були зразки низьколегованих сталей марок 09Г2С і 17Г1С, вирізані з демонтованих труб, призначених для транспортування нафти.

Підготовку зразків і їх експериментальні випробування проводили відповідно з методиками, приведеними в роботах [1, 2].

Отримані результати досліджень показали, що зі збільшенням вмісту водню в наплавленому металі зменшується його здатність до пластичної деформації. Так, з рис. 1 видно, що при зміні вмісту водню від 1,0 до 7,3 см³/100 г початкові ділянки діаграми статичного згину співпадають, а руйнування проходить на більш ранній стадії деформування.

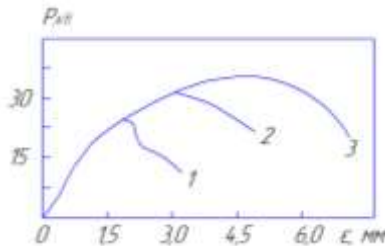


Рис. 1. Зміна виду діаграми статичного згину для наплавленого металу на сталі 09Г2С в залежності від вмісту дифузійного водню: сталь 09Г2С, електроди УОНИ-13/55: 1 – 8,0см³/100г; 2 – 4,0см³/100г; 3 – 1,0см³/100г

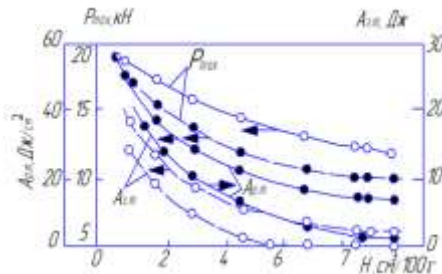


Рис. 2. Вплив дифузійного водню на розповсюдження тріщин і на максимальне руйнующе навантаження для наплавленого металу на сталі 17Г1С: $W_{охл} = 50^{\circ}\text{C}/\text{с}$; $W_{охл} = 50^{\circ}\text{C}/\text{с}$

Зі збільшенням вмісту дифузійного водню в наплавленому металі різко зменшується спротив його крихким руйнуванням. Як видно з рис. 2, при вмісті водню $8,1 \text{ см}^3/100\text{г}$ для наплавленого металла на сталі 09Г2С при $W_{\text{охл}} = 40^\circ\text{C}/\text{с}$ робота зародження тріщини $A_{\text{зт}}$ – $1,5 \text{ Дж}$, а при зменшенні вмісту водню до $1,5 \text{ см}^3/100\text{г}$ величина $A_{\text{зт}}$ зростає до $17,6 \text{ Дж}$, тобто більше ніж в 11 разів. Підвищення швидкості охолодження до $55^\circ\text{C}/\text{с}$ призводить до ще більшого зниження $A_{\text{зт}}$, а при вмісті водню більше $5,0 \text{ см}^3/100\text{г}$ вона практично дорівнює нулю. Зі збільшенням розчиненого в металі водню зменшується також максимальне руйнівне навантаження, однак з ростом швидкості охолодження воно дещо підвищується.

Зі збільшенням вмісту водню в зварному шві зменшується також робота розповсюдження тріщини. Так, при концентрації водню $1,0 \text{ см}^3/100\text{г}$ для зварного з'єднання із сталі 09Г2С при $W_{\text{охл}} = 40^\circ\text{C}/\text{с}$, величина $A_{\text{рт}} = 48,5 \text{ Дж}/\text{см}^2$, а при збільшенні концентрації водню до $8,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ – знижується до $18,5 \text{ Дж}/\text{см}^2$, тобто приблизно в 2,7 рази. Слід звернути увагу на зміну виду поверхні злому випробуємих зразків. Так, при $[H] < 10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ фрактограма злому складається на 90 – 95% з волокнистої поверхні (при $T = 20^\circ\text{C}$), а при $[H] = 8,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ – на 30–40%, що вказує на підвищення критичної температури крихкості. При досягненні швидкості охолодження зварного з'єднання величини $55^\circ\text{C}/\text{с}$ роботу $A_{\text{рт}}$ виявилось не можливо визначити, так як на діаграмі статичного згину спостерігається повний зрив.

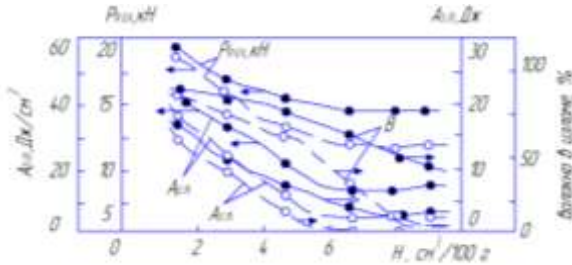


Рис. 3. Робота зародження і розповсюдження тріщини:
 P_{max} – максимальне руйнівне навантаження, сталь 09Г2С:
 $T = +30^\circ\text{C}$; $T = -30^\circ\text{C}$

Як видно з рис. 3, при постійній температурі збільшення вмісту водню призводить до зниження волокнистої складової (В) в зломі. Коли зварка проводилась при кімнатній температурі і вміст водню складав $1,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, то величина $B = 90\text{--}100\%$ і поверхня злому знаходиться у в'язкому стані, а коли зварка виконувалась при $T = -40^\circ\text{C}$ і вміст водню рівний $8,0 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, то параметр $B = 10\text{--}20\%$ і поверхня знаходиться в крихкому стані. Пониження температури при зварці від -30 до -40°C приводить до зниження вмісту волокна в зломі до $20\text{--}30\%$, а наплавлений метал з вмістом водню $5\text{--}8 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ переходить в крихкий стан. Це свідчить про те, що з пониженням температури навколишнього

середовища і з підвищенням концентрації розчиненого водню збільшується критична температура крихкості ($T_{кр}$) приблизно на 40–50⁰С.

Із отриманих результатів слідує, що для наплавленого в умовах низьких температур метала, який знаходиться в крихкому стані, водневе окрихчення проявляється в значно більшій мірі, ніж для металу, який знаходиться у в'язкому стані.

В теперішній час існує багато гіпотез водневої крихкості сталі, однак вони не можуть в достатній мірі обґрунтувати усі наявні фактичні дані з цього питання. Заслугує увагу гіпотеза щодо механізму окрихчення сталі під дією дифузійного водню. Розглянемо ці гіпотези з точки зору різних форм існування водню в наплавленому металі, аби пояснити механізм зародження і росту тріщин в зварних з'єднаннях.

Відомо [2], що коефіцієнт дифузії водню для наплавленого метала і зони термічного впливу (ЗТВ) складає $10^{-5} - 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$. Для порівняння: коефіцієнти дифузії вуглецю і азоту в залізі при 20⁰С складають $2 \cdot 10^{-17}$ і $8,8 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2/\text{с}$ відповідно. Велику різницю в рухомості дифузійного водню (10–12 порядків) в сталі в порівнянні з іншими елементами впровадження можна пояснити тим, що дифузійний водень в наплавленому металі і в ЗТВ, як встановили І.К. Походня і В.І. Швачко [3], знаходиться у вигляді протонів. Це побічно підтверджується різним вмістом дифузійного водню в металі шва в залежності від роду і полярності струму. Висока рухомість дифузійного водню також свідчить про те, що він знаходиться не в зв'язаному стані. Коли прийняти, що дифузійний водень в наплавленому металі знаходиться у вигляді протонів, то можна пояснити процеси дифузії його із шва в НШЗ як під час, так і після зварки, взаємодією з дислокаціями, а також сталості границі текучості σ_t метала зі збільшенням дифузійного водню. Наприклад, дислокації в сталі занадто великі для протонів водню, щоб вони змогли їх закріпити і змінити границю текучості. Вуглець і азот взаємодіють з дислокаціями в залізі, ці елементи здатні закріпитися на них, що й приводить до росту σ_t . Саме взаємодією розчинених вуглецю і азоту з дислокаціями заліза, автори [4, 5, 8] пояснюють термічне старіння і синеломкість метала.

Механізм окрихчення наплавленого метала під дією дифузійного водню відбувається завдяки взаємодії протону із зовнішніми електронами атома заліза. В результаті цієї взаємодії послаблюються сили зв'язку між атомами в решітці заліза, що виражається в зменшенні ефективної поверхневої енергії. Результати досліджень, які приведені вище, показують, що з ростом вмісту дифузійного водню в зварному шві до 5–8 $\text{см}^3/100 \text{ г}$ різко зменшується (в 10–12 раз) робота зародження тріщини і в 3–4 рази – робота розповсюдження тріщини. При цьому також зменшується кількість волокнистої складової в зломі і підвищується критична температура крихкості.

При зварці залишковий водень може накопичуватися в різних мікропорах метала шва і ЗТВ. В процесі зварки внаслідок її короткого терміну і в перші хвилини після зварки тиск молекулярного водню в мікропорах, мабуть, великий і в цей період роль залишкового (молекулярного) водню в механізмі окрихчення мала. Однак, після закінчення зварки тиск молекулярного водню в мікропорах метала шва і ЗТВ підвищується. Величина тиску залежить від концентрації

дифузійного водню, температури, терміну після зварки і ін. Тиск молізованого водню в мікропорах підсилює дія силового фактору і, тим самим, сприяє утворенню холодних тріщин. Цим пояснюється і той факт, що холодні тріщини в метали шва і ЗТВ під дією водню утворюються після закінчення зварки. Існують і інші точки зору на механізм водневої крихкості сталі і зварних з'єднань, однак роль водню в зниженні крихкої міцності шва і ЗТВ не викликає сумніву і є загальнопризнаною.

Висновки. Існуючі науково-практичні дослідження впливу водню на параметри тріщиностійкості характеризуються невизначеністю і протиріччям, відсутністю чітких уявлень про механізм зародження і розповсюдження холодних тріщин, а отже нема виважених підходів стосовно протидії тріщиноутворенню в процесі тривалої експлуатації трубопроводів, а тому потрібні додаткові дослідження. Встановлено, що зі збільшенням вмісту дифузійного водню в наплавленому металі різко зменшується спротив його крихкому руйнуванню. Так, при вмісті водню $8,1 \text{ см}^3/100\text{г}$ в наплавленому металі і швидкості охолодження $W_{\text{охл}} = 4,0 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ робота зародження тріщини $A_{\text{зт}} = 1,5 \text{ Дж}$, а при $1,5 \text{ см}^3/100\text{г}$ величина $A_{\text{зт}}$ зростає до $17,6 \text{ Дж}$, тобто більш ніж в 11 раз. Коли вміст водню вище $5,0 \text{ см}^3/100\text{г}$, а $W_{\text{охл}} = 55 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, то значення $A_{\text{зт}}$ практично рівне нулю. Показано, що зі збільшенням вмісту водню в зварному шві зменшується також робота розповсюдження тріщини $A_{\text{рт}}$. Так, при концентрації водню $1,0 \text{ см}^3/100\text{г}$ для зварного з'єднання на сталях 09Г2С і 17Г1С при $W_{\text{охл}} = 4,0 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{г}$ величина $A_{\text{рт}} = 48,5 \text{ Дж}/\text{см}^2$, а при збільшенні його вмісту до $8,0 \text{ см}^3/100\text{г}$ робота $A_{\text{рт}}$ знижується до $18,5 \text{ Дж}/\text{см}^2$, тобто приблизно в 2,7 рази. Зниження температури повітря при зварці до $-30 \dots -40 \text{ }^\circ\text{C}$ і підвищення концентрації розчиненого водню в зварному шві до $5\text{--}8 \text{ см}^3/100\text{г}$ призводять до збільшення критичної температури крихкості приблизно на $40\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Список літератури:

1. Панасюк В.В., Андрейків А.Е., Партон В.З. Механіка руйнування і прочність матеріалів: Справочне посібник. Київ: Наукова думка, 1988. 488 с.
2. Радкевич О.І., П'ясецький О.С., Василенко І.І. Корозійно-механічна тривкість трубної сталі в сірководневому середовищі. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, 2000. 3. С. 93-97.
3. Чапля О., Радкевич О., П'ясецький О., Спектор Я. Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами. *Машинознавство*, 1999. 8. С. 52-56.
4. Василенко І.І., Мелехов Р.К. Коррозионное растрескивание сталей. Київ: Наукова думка, 1974. 265 с.
5. Makarenko V.D., Shatilo S.P., Astafev V.I. Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. *Welding International*, 1998. 12(12), 988-991. <https://doi.org/10.1080/09507119809448548>.
6. Makarenko V.D., Shatilo S.P. Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*, 1999. 13(12), 991-995. <https://doi.org/10.1080/09507119909452086>.
7. Самойленко М.І. Функціональна надійність трубопроводів них транспортних систем. Харків: ХНАМІ. 2009. 184с.

8. Berdnyk O.Yu., Lastivka O.V., Maystrenko A.A., Amelina N.O. Processes of structure formation and neof ormation of basalt fiber in an alkaline environment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 907: 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/907/1/012036>.

References:

1. Panasyuk, V.V., Andreykiv, A.E., & Parton, V.Z. (1988). Fracture mechanics and strength of materials: A reference guide. Kyiv: Naukova Dumka.
2. Radkevich, O.I., P'yasetsky, O.S., & Vasilenko, I.I. (2000). Corrosion-mechanical corrosion of pipe steel in a hot-water medium. *Phys.-chem. Mechanics of Materials*, 3. 93-97.
3. Chaplya, O., Radkevich, O., Pyasetsky, O., & Spektor, Y. (1999). Rival analysis of corrosion-mechanical properties of 20YuCh laminated steel with foreign analogues. *Mashinostroyeniye*, 8. 52-56.
4. Vasilenko, I.I., & Melekhov, R.K. (1974). *Corrosion cracking of steels*. Kyiv: Naukova Dumka.
5. Makarenko, V.D., Shatilo, S.P., Astafev, V.I. (1998). Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. *Welding International*, 12(12). 988-991. <https://doi.org/10.1080/09507119809448548>.
6. Makarenko, V. D., Shatilo, S. P. (1999) Increasing desulphurization of the metal of welded joints in oil pipelines. *Welding International*, 13(12). 991-995. <https://doi.org/10.1080/09507119909452086>.
7. Samoylenko, M.I. (2009). *Funktional reliability of pipelines of transport systems*. Harkiv: HNAMP.
8. Berdnyk, O.Yu., Lastivka, O.V., Maystrenko, A.A., & Amelina, N.O. (2020). Processes of structure formation and neof ormation of basalt fiber in an alkaline environment. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 907: 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/907/1/012036>.

V. Makarenko, V. Gots, O. Berdnyk, N. Amelina, I. Yasenova

The influence of hydrogen on the resistance to the formation of cracks in welded joints of water supply pipelines

The existing scientific and practical studies of the influence of hydrogen on the parameters of crack resistance are characterized by uncertainty and contradiction, the lack of clear ideas about the mechanism of the initiation and propagation of cold cracks, and therefore there are no balanced approaches to combating the formation of cracks during the long-term operation of pipelines, and therefore additional studies are needed. It was established that with an increase in the content of diffusible hydrogen in the deposited metal, the resistance to its brittle destruction decreases sharply. Thus, with a hydrogen content of 8,1 cm³/100g in the deposited metal and a cooling rate Wohl = 4,0 °C/s, the crack initiation work Azt = 1,5 J, and at 1,5 cm³/100g, the value of Azt increases to 17,6 J, that is, more than 11 times. When the hydrogen content is higher than 5,0 cm³/100g, and Wohl = 55 °C/s, the Azt value is practically zero. It is shown that with an increase in the hydrogen content in the weld, the work of crack propagation also decreases Art. Thus, with a hydrogen concentration of 1,0 cm³/100g for a welded joint on steels 09Г2С and 17Г1С at Wohl = 4.0 °C/100g, the value of Art = 48,5 J/cm², and

when its content increases to $8,0 \text{ cm}^3/100\text{g}$, the work of Art decreases to $18,5 \text{ J/cm}^2$, i.e. approximately 2,7 times. A decrease in the air temperature during welding to $-30\dots-40^\circ\text{C}$ and an increase in the concentration of dissolved hydrogen in the weld seam to $5-8 \text{ cm}^3/100\text{g}$ lead to an increase in the critical brittleness temperature by approximately $40-50^\circ\text{C}$. Plastic deformations that inevitably occur in welded joints and structures, according to their nature of occurrence in the process of the technological cycle of manufacturing and operation of a welded structure, can be divided into the following groups: a) initial deformations in the base metal, which depend on the method of obtaining and processing the metal, foundry, powder metallurgy, pressure (rolling, stamping, forging); b) deformations occurring during procurement operations and assembly, cutting, straightening, bending, rolling, fixing on assembly devices; c) welding deformations arising as a result of the thermal deformation cycle of welding; d) technological deformations; d) operational deformations that may occur during operation as a result of local overloads, loss of stability, etc.

Key words: hydrogen, cracks, fragility, destruction, reliability, degradation.

Посилання на статтю:

АРА: Makarenko, V., Gots, V., Berdnyk, O., Amelina, N. & Yasenova, I. (2023). The influence of hydrogen on the resistance to the formation of cracks in welded joints of water supply pipelines. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 52(1), 82-89.

ДСТУ: Макаренко В.Д., Гоц В.І., Бердник О.Ю., Амеліна Н.О., Ясенова І.С. Вплив водню на спротив утворенню тріщин в зварних з'єднаннях трубопроводів водопостачання. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2023. № 52(1). С. 82-89.