

# Техніка і технології

УДК 622.692.4

## КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

*Д.Ю. Петрина, О.Л. Козак, Ю.Д. Петрина*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42153,  
e-mail: drill@nuing.edu.ua*

*Останнім часом причиною експлуатаційних пошкоджень магістральних трубопроводів все частіше стають зварні з'єднання. За сумісної дії механічних навантажень і робочих середовищ зварні з'єднання мають підвищену схильність до крихкого руйнування. Цьому сприяє їх макро- і мікронеоднорідність за хімічним складом, структурою та механічними властивостями.*

*Фізико-механічні та електрохімічні властивості вихідних зварних з'єднань (зварюються дві неексплуатовані труби) до певної міри вивчені. Однак під час ремонту трубопроводів до експлуатованої труби приварюється катушка з труби запасу. Це може змінити структурний стан матеріалу в зоні термічного впливу і призвести до зміни корозійно-механічних властивостей металу.*

*Матеріалу зони термічного впливу досліджуваних зварних з'єднань сталі 17Г1С властива мікроструктура стовпчастих кристалітів. Проте для ремонтних швів мікроструктура кристалітів була більш крупнозернистою порівняно з вихідними.*

*Виявлено аномалію у механічній поведінці матеріалу зони термічного впливу ремонтних швів, що проявляється в зниженні твердості НВ, характеристик міцності  $\sigma_6$  і  $\sigma_{0,2}$  за одночасного зменшення відносного звуження  $\psi$ , ударної в'язкості, статичної та циклічної тріщиностійкостей.*

*Найвища інтенсифікація корозії відбувається в матеріалі зони термічного впливу ремонтних швів, де також існує велика імовірність появи додаткової вибіркової корозії.*

*В роботі використано п'ять схем навантаження та наводнювання досліджуваних зразків. Показано, що матеріал зони термічного впливу ремонтних швів зварних з'єднань сталі 17Г1С проявив себе як більш чутливий до водневого окрихчення порівняно з матеріалом зони термічного впливу вихідних зразків.*

*Встановлено втомну чутливість електрохімічних показників до структурно-хімічної неоднорідності різних зон зварного з'єднання трубопроводу.*

*Ключові слова: характеристики міцності, пластичність, ударна в'язкість, поляризаційний опір, стаціонарний потенціал, воднева крихкість, електрохімічна гетерогенність.*

*В последнее время причиной эксплуатационных поврежденных магистральных трубопроводов все чаще становятся сварные соединения. При совместном воздействии механических нагрузок и рабочих сред сварные соединения имеют повышенную склонность к хрупкому разрушению. Этому способствует макро- и микронееднородность по их химическому составу, структуре и механическим свойствам.*

*Фізико-механічні та електрохімічні властивості вихідних зварних з'єднань (сварюються дві неексплуатовані труби) в одній мірі вивчені. Однак при ремонті трубопроводів експлуатованої труби приварюється катушка труби запасу. Це може змінити структурне стан матеріалу в зоні термічного впливу і призвести до змін корозійно-механічних властивостей металу.*

*Матеріали зони термічного впливу досліджуваних зварних з'єднань сталі 17Г1С мають мікроструктуру столбчатих кристалітів. Однак для ремонтних швів мікроструктура кристаллів була більш крупнозернистою порівняно з вихідними. Обнаружена аномалія в механічному поведінці матеріалу зони термічного впливу ремонтних швів, що проявляється в зниженні твердості НВ, прочностних  $\sigma_6$  і  $\sigma_{0,2}$  при одночасному зменшенні відносного звуження  $\psi$ , ударної в'язкості, статичної та циклічної тріщиностійкостей.*

*Высокая интенсификация коррозии наблюдается в материале зоны термического влияния ремонтных швов, где также существует большая вероятность появления дополнительной выборочной коррозии.*

*В работе использовали пять схем нагрузки и наводороживания исследуемых образцов. Показано, что материал зоны термического влияния ремонтных швов сварных соединений сталей 17Г1С проявил себя более чувствительным к водородной хрупкости по сравнению с материалом этой зоны в исходных образцах.*

*Установлена усталостная чувствительность электрохимических показателей к структурно-химической неоднородности различных зон сварного соединения трубопровода.*

Ключевые слова: характеристики прочности, пластичность, ударная вязкость, поляризационное сопротивление, стационарный потенциал, водородная хрупкость, электрохимическая гетерогенность.

*Welded joints have recently become the reason of operational damages of the main pipelines even more often. On joint action of mechanical loadings and working environments welded have the raised propensity to brittle fracture. Macro and microheterogeneity by a chemical compound, structure and mechanical properties lead to this phenomena.*

*Physicomechanical and electrochemical properties of initial welded joints (welding of two unexploited pipes) are studied to f certain extend. However while maintenance pipelines stock pipe spool is welded. It can change a structural condition of a material in area of thermal influence and it canlead to changes of corrosive and mechanical properties of metal.*

*Materials of area of thermal influence of investigated welded joints of a steel 17Г1С the microstructure of columnar crystals is peculiar. However, for maintenance seams it was more hard-grained in comparison with initial. There is the anomaly in mechanical behaviour of a material area of thermal influence of maintenance seams that is shown in decrease in hardness HB, durability characteristics  $\sigma_b$  and  $\sigma_{0,2}$  at simultaneous reduction of cross-sectional area  $\psi$ , impact strength, static and cyclic crack resistance.*

*The high intensification of corrosion occurs in a material area of thermal influence of maintenance seams in which there is also a high probability of occurrence of additional selective corrosion.*

*Five schemes of loading and hyarogenation of investigated samples of used. It is shown, that the material area of thermal influence of maintenance seams of welded joints of a steel 17Г1С has proved more sensitive to hydrogen induced cracking in comparison with a material of this area of initial samples.*

*Fatigue sensitivity of electrochemical indicators to structurally-chemical heterogeneity of various areas of welded joints of the pipeline established.*

Keywords: durability characteristics, plasticity, impact strength, polarising resistance, stationary potential, hydrogen embrittlement, electrochemical heterogeneity

Більшість магістральних нафтогазопроводів (НГП) України експлуатуються тривалий час, що призводить до постійного зростання їх відсотку із відпрацьованим нормативним терміном [1, 2]. Різноманітні обстеження магістральних трубопроводів (МТ) свідчать, що останнім часом причиною їх експлуатаційних пошкоджень все частіше стають зварні з'єднання (ЗЗ) [3-7]. Це стосується, в першу чергу, багатшарових монтажних швів, які після зварювання практично не піддаються технологічним обробкам з метою зменшення залишкових напружень. За сумісної дії механічних навантажень і робочих середовищ ЗЗ мають підвищену схильність до крихкого руйнування. Цьому сприяє їх макро- і мікронеоднорідність за структурою, хімічним складом і механічними властивостями. Саме тому в процесі будівництва МТ гостро стоїть проблема виконання зварювальних робіт з високою продуктивністю та стабільною якістю, оскільки зварювання великою мірою визначає довговічність магістральних НГП та їхню експлуатаційну безпеку [8].

Механізоване зварювання застосовують у промисловості близько 55 років, однак його частка в спорудженні МТ на території СНД досі залишається незначною [9]. Водночас ручне зварювання досягло високої продуктивності та якості завдяки застосуванню поточно-роздільного та поточно-групового методів [10]. Проведені наукові дослідження проблем механізації зварювальних робіт показали, що основними перешкодами для їх розширеного впровадження є дефекти ЗЗ, що виникають за різних недоліків технологічного процесу зварювання (западання валиків швів під час виконання облицювальних проходів, підвищене розбризкування електродного металу тощо) [11]. Тому для забезпечення високої якості ЗЗ процеси механі-

зованого зварювання потребують подальшого розвитку та вдосконалення.

Збільшення експлуатаційного ресурсу МТ безпосередньо пов'язане з подальшим підвищенням якості ЗЗ за високої продуктивності зварювання. На даний час ми маємо вже низку вітчизняних розробок, які відповідають вказаним задачам [12-14]. В роботі [15] проаналізовано технологічні особливості, режими зварювання і властивості зварних з'єднань основних сучасних способів з'єднання МТ. Показано, що термін експлуатації багатьох НГП досяг 40 років, однак до сьогоднішнього дня не зафіксовано жодної відмови з'єднання.

Однак навіть найбільш якісні зварні шви в процесі довготривалої експлуатації деградують, що зрештою призводить до їх руйнування. Надзвичайно важливо встановити механізми руйнування зварних швів, отриманих за різними технологіями, вивчити їх спорідненість і відмінності. В цьому напрямку перші дослідження вже проводяться [4-7, 16, 17]. Особливу увагу слід звернути на вивчення надійності ще одного виду зварних швів – ремонтних. За наявності в тілі труби тріщиноподібних дефектів, ця частина її вирізається з трубопроводу. На вільне місце встановлюється котушка з вихідного матеріалу і приварюється до експлуатованого металу. Така технологія може суттєво змінити структурний стан сталі від зварного шва до основного експлуатованого матеріалу. А це, в свою чергу, призводить до зміни корозійно-механічних властивостей металу в згаданому діапазоні. Натомість нам зовсім не траплялись роботи, в яких би вивчалось це питання. Тому його актуальність і своєчасність не викликає ніяких сумнівів.

Мета даної роботи – провести порівняльну оцінку корозійно-механічних властивостей різ-

них зон вихідного та ремонтного зварних з'єднань сталі 17Г1С.

В червні 2010 на газопроводі, який підпорядкований УУМГ «Прикарпаттрансгаз», відбулася аварія - розрив по кільцевому зварному шву (рис. 1).

Поверхня зламу такого шва піддавалася візуальному фрактографічному аналізу. Ніяких пластичних скосів під кутом  $45^{\circ}$  не спостерігалося. Отже, характер руйнування був повністю крихким. Загальновідомо, що такий вид руйнування особливо чутливий до сумісної дії напружено-деформованого стану конструкції та робочого середовища, а також макро- і мікро-неоднорідності за структурою, хімічним складом і механічними властивостями. Це властиво, в першу чергу, кільцевим ЗЗ, які не піддаються термічній обробці після зварювання, залишкові напруження в них не усуваються, стаючи вогнищами зародження тріщиноподібних дефектів.

Аналіз руйнування зварного шва показав, що найбільша густина мікротріщин зосереджена в навколошовній ділянці. Звідси починаються корозійні процеси. Корозійна тріщина росте вздовж і в напрямку до ЗЗ. Відтак, перетнувши, його, переходить на протилежну за швом навколошовну ділянку. Як видно з рис. 1, ЗЗ по кільцю свого тіла не руйнується. Отже, відповідальними за руйнування ЗЗ є дефекти навколошовних ділянок. На наш погляд, це пов'язано із високою електрохімічною гетерогенністю ЗЗ, що призводить до активізації локальних корозійних процесів як у металі зони термічного впливу (ЗТВ), так і в металі зварного шва (ЗШ).



Рисунок 1 – Вид зруйнованого зварного шва

Дослідження проводили на зразках ремонтних стикових ЗЗ зі сталі 17Г1С, вирізаних з труби запасу і з котушки діаметром 1220 мм

товщиною стінки 12 мм з трубопроводу «Угерсько-Чернівці», термін експлуатації якої становив 31 рік.

Аналогічні випробування проводили на стиковому ЗЗ сталі 17Г1С, вирізаному з труби запасу.

Зразки зварних з'єднань виготовляли з V-подібною підготовкою кромки. З'єднання отримували ручним електродуговим зварюванням електродами УОНИ-13/55 Ø5-УД1, які попередньо прогрівались протягом однієї години за температури 560 К і сили струму 210 А. Джерелом живлення слугував випрямляч зварний типу ВКС-500-1. Кут наплавлення шва складав  $90^{\circ}$ . Механічні властивості визначали розтягом зі швидкістю деформування  $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  на машині УМЕ-10Т циліндричних зразків діаметром робочої частини 5 мм і довжиною 25 мм. Зразок охоплював всі зони ЗЗ: зварний шов (ЗШ) у центрі завширшки 3...4 мм, ЗТВ – до 11 мм по обидва боки від ЗШ і основний метал (ОМ). У певній зоні ЗЗ виконували кільцевий концентратор напружень глибиною 1 мм. При цьому отримували умовні характеристики міцності ( границя міцності  $\sigma_B$  і границя плинності  $\sigma_{0,2}$ ) та пластичності (відносне звуження  $\psi$ ). Ударну в'язкість КСВ визначали за Шарпі, а статичну тріщиностійкість – за  $J_{1c}$  [18].

Істотне значення має врахування структурних змін, що виникають у металі під час зварювання.

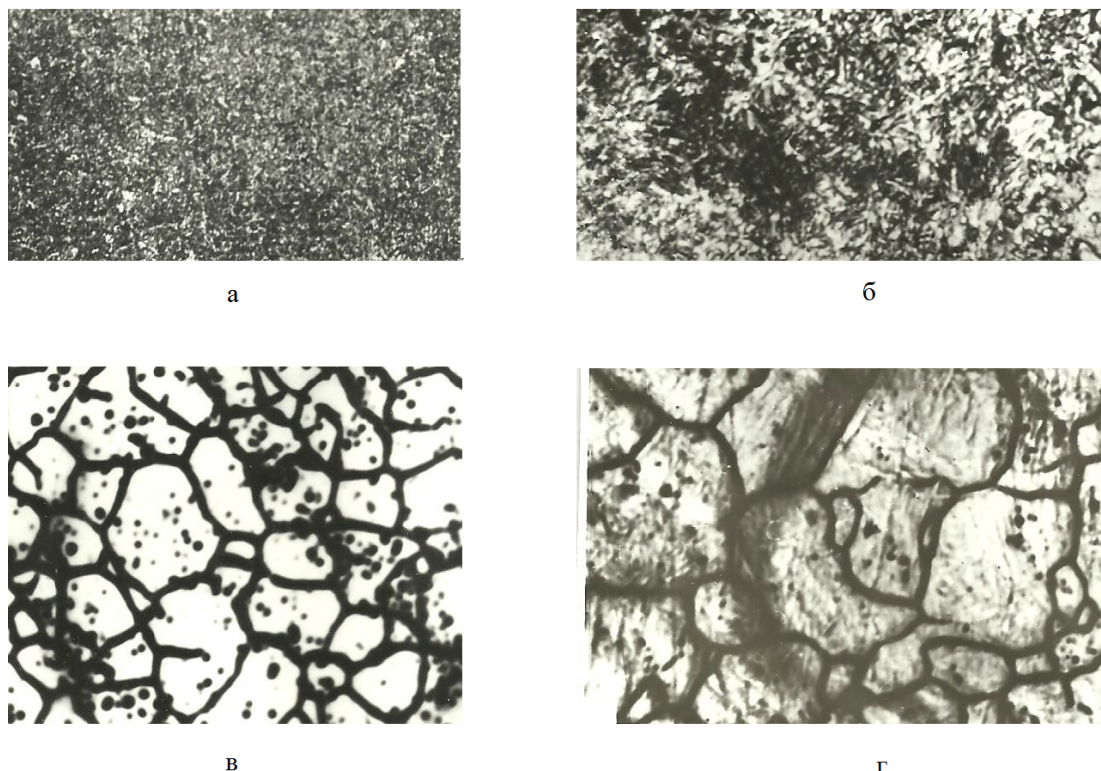
Структури МШ як вихідних, так і ремонтних зразків не виявили жодних відхилень, проте на відстані близько 7 мм від ЗШ структура металу таких зразків у ЗТВ суттєво змінилася (рис. 2).

Мікроструктури вихідних (рис. 2а) і ремонтних (рис. 2б) зразків ЗЗ сталі 17Г1С в ЗТВ – стовпчасті кристаліти. Однак в другому випадку вони є більш крупнозернистими. Це підтверджується зростанням розмірів зерен фериту (порівняти рис. 2в і 2г). Феритні зерна розмежовані карбідами, причому в ремонтних зразках ЗЗ розміри їх також більші, ніж у вихідних. Крупнозерниста зона має знижену корозійну стійкість і піддається сильній загальній корозії. Їй властива також підвищена чутливість до корозійного розтріскування.

Результати механічних випробувань вихідних і ремонтних зразків ЗЗ наведено в таблиці 1.

Зауважимо, що для КСВ у чисельнику вказані середні значення результатів випробувань (не менше чотирьох зразків), а в знаменнику – найменші значення.

Як і очікувалося, всі механічні властивості МШ для вихідних і ремонтних зразків ЗЗ майже повністю співпадають. В свою чергу, механічні показники ОМ ремонтного зразка ЗЗ відповідали аналогічним параметрам деградованої протягом тридцяти одного року сталі 17Г1С. У всіх випадках випробувань твердість НВ змінювалася не суттєво. Механічні показники вихідних і ремонтних зразків ЗЗ для ЗТВ і ОМ майже не відрізняються в межах кожного стану зразків ЗЗ. Однак всі ремонтні зразки мали нижчі відповідні параметри, ніж вихідні зразки. Останнє



а, б – x200; в, г – x600

Рисунок 2 – Мікроструктура (а, б) і величина аустенітного зерна (в, г) вихідних (а, в) і ремонтних (б, г) зразків 33 сталі 17Г1С в ЗТВ

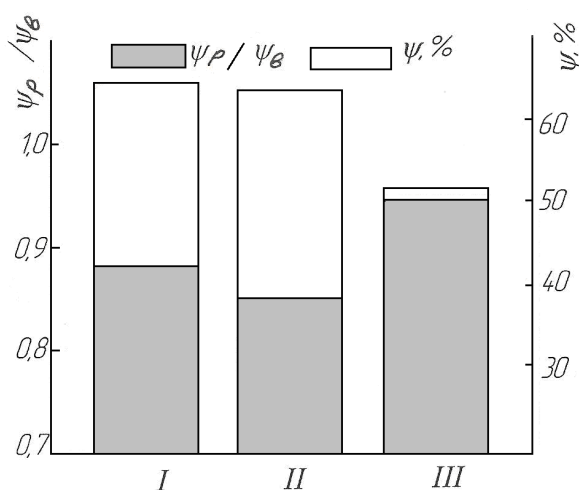
Таблиця 1 – Механічні властивості різних зон 33 сталі 17Г1С

Зони 33	Стан зразка 33	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	НВ	$\psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>
МШ	Вихідний	942	753	207	51	232/192
	Ремонтний	940	755	208	48	230/190
ЗТВ	Вихідний	809	651	202	61	192/184
	Ремонтний	794	633	200	52	151/102
ОМ	Вихідний	796	653	187	62,5	274/260
	Ремонтний	785	627	183	55	203/160

свідчить, що ЗТВ, яка розміщена між МШ і ОМ експлуатованої труби, має підвищену чутливість до утворення тріщиноподібних дефектів. Це сприяє активізації локальних корозійних процесів і призводить до крихкого руйнування 33 трубопроводу.

Для оцінки пластичності різних зон 33 слугував параметр відносного звуження  $\psi$ . В роботах [1, 2, 7] показано, що це єдиний показник, який доцільно використовувати з цією метою. Для оцінки інтенсивності зміни пластичності різних зон 33 ремонтних зразків порівняно із зразками вихідними використали відношення відносного звуження ремонтних зразків  $\psi_p$  до відносного звуження вихідних зразків  $\psi_b$ , тобто  $\psi_p/\psi_b$  (рис. 3).

З таблиці 1 і рис. 3 видно, що показник пластичності  $\psi$  для МШ знаходиться як для вихідного, так і для ремонтного зразків 33 практично на одному рівні. Причому його величина є найменшою з усіх зон 33. Для ОМ і ЗТВ спостерігається спад механічних характеристик



I – ОМ; II – ЗТВ; III – МШ

Рисунок 3 – Вплив стану зразків 33 на інтенсивність зміни пластичності різних зон 33 сталі 17Г1С

$\sigma_b$  і  $\sigma_{0,2}$  зразків ремонтного стану порівняно з вихідними зразками ЗЗ. Тому очікувалось певне зростання пластичності цих зон ЗЗ в ремонтних зразках. Однак, всупереч очікуванню, відносне звуження  $\psi$  ремонтних зразків також зазнало спаду. Тобто його поведінка була такою, як і у експлуатаційно деградованих трубних сталей [1, 2, 7, 17]. Найбільшого спаду величина  $\psi$  зазнала у ЗТВ. Наведені вище результати свідчать про те, що ЗТВ ремонтних зразків ЗЗ зазнала найбільшого окрихчення матеріалу, ніж ця ж зона вихідних зразків.

Що ж стосується ударної в'язкості, то найбільше її значення було зафіксовано для ОМ вихідного зразка ЗЗ – 274 Дж/см<sup>2</sup>. При цьому дані експериментальних досліджень мали дуже малий розкид. Ударна в'язкість ОМ ремонтного зразка ЗЗ порівняно з попереднім випробуванням зменшилась на 26 %, зросло розсіювання експериментальних даних. Зауважимо, що випробування на ударну в'язкість обох типів зразків ЗЗ ( вихідний і ремонтний) МШ показали практично один рівень KCV. Не було також різниці в оцінці розкиду експериментальних даних.

Порівняно з МШ ударна в'язкість вихідних зразків ЗЗ у ЗТВ спала на 17,2 %, а ремонтних зразків ЗЗ – на 34,3 %. Причому якщо в першому випадку дані експериментальних досліджень мали дуже малий діапазон розсіювання, то в другому він був найбільшим серед всіх проведених в даному напрямку випробувань. Отже, як у випадку оцінки пластичності, так і за випробувань на ударну в'язкість показано, що найінтенсивніше окрихчується метал ЗТВ у ремонтних зразках ЗЗ.

Відомо, що зміна мікроструктури сталі суттєво впливає на рівень статичної тріщиностійкості металу. Для її визначення нормативні документи України рекомендують користуватися критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень при статичному руйнуванні в умовах максимального стиснення пластичної деформації  $K_{Ic}$  [19, 20]. Однак визначити коректне значення  $K_{Ic}$  для високопластичних трубних сталей за кімнатної температури випробувань не має змоги, оскільки в процесі руйнування не забезпечуються умови плоско-деформованого стану. Достовірну оцінку статичної тріщиностійкості трубної сталі 17Г1С можна виконати методом J-інтегралу [18]. В цьому випадку критичне значення J-інтегралу оцінювали за моментом початку поширення тріщини  $J_{Ic}$ . Результати досліджень подані на рис. 4.

МШ вихідних і ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С мають найвищу статичну тріщиностійкість. Для обох станів зразків її величина практично однакова. Зміна мікроструктури сталі у ЗТВ помітно знижує величину параметра  $J_{Ic}$ . Це зниження для вихідних зразків ЗЗ становить 15 % порівняно з МШ, а для ремонтних зразків ЗЗ – аж 40 %. Отже, як і у всіх попередніх випадках знову спостерігаємо погіршення механічних властивостей матеріалу ЗТВ у ремонтних зразках.

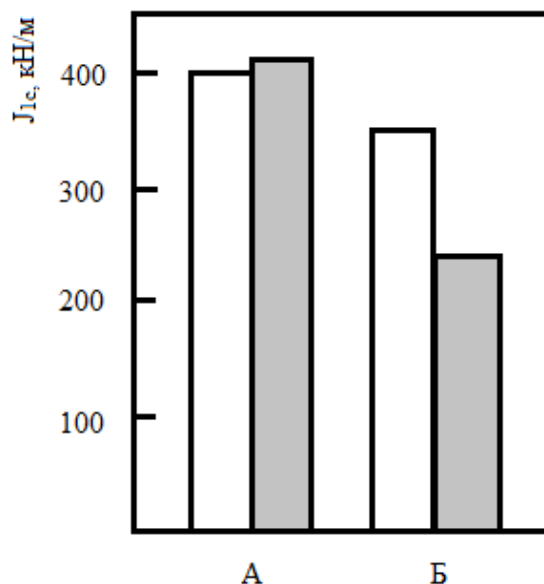


Рисунок 4 – Статична тріщиностійкість  $J_{Ic}$  МШ (А) і ЗТВ (Б) вихідних (білі) і ремонтних (чорні стовпчики) зразків ЗЗ сталі 17Г1С

Вивчалось також вплив робочого середовища на статичну тріщиностійкість досліджуваних зразків. Таким середовищем слугував модельний розчин водного конденсату (МРВК) [2].

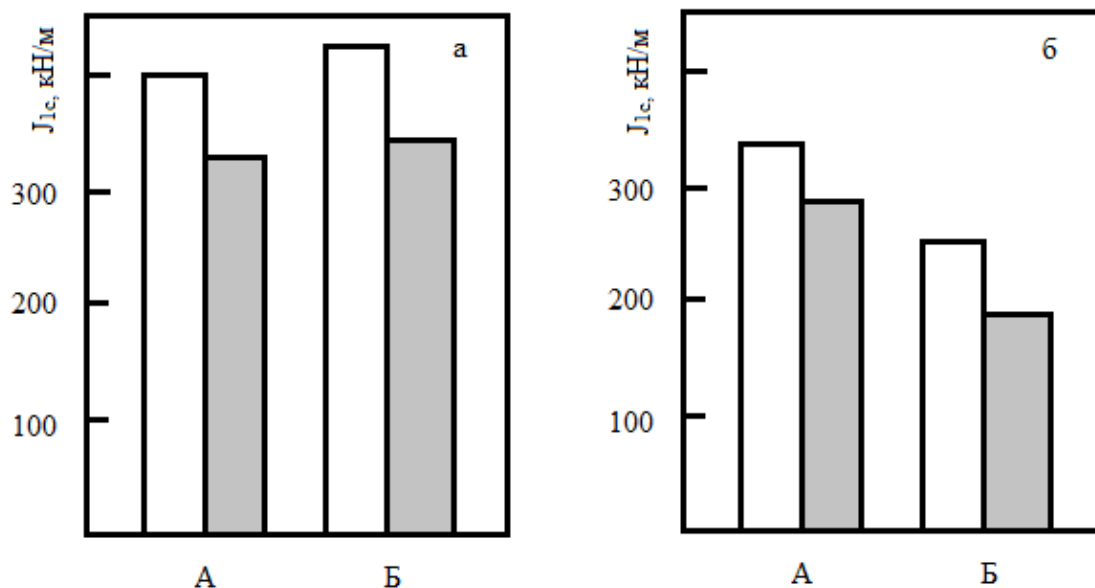
Як видно з даних, наведених на рис. 5, спад параметра  $J_{Ic}$  для МШ вихідних і ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С під впливом МРВК становить біля 20 %. Це досить суттєве пониження статичної тріщиностійкості, і воно пов'язане, на наш погляд, з низькою пластичністю матеріалів зразків (див. табл. 1). Найменший спад статичної тріщиностійкості під дією робочого середовища спостерігався у ЗТВ вихідних зразків ЗЗ (~ 14 %), а найбільший – у цій же зоні ремонтних зразків ЗЗ ( близько 24 %). Отже, ЗТВ ремонтних зразків ЗЗ є найбільш чутливою до спаду статичної тріщиностійкості під дією корозійно-активного середовища.

Якщо порівняти випробування на циклічну та статичну тріщиностійкість, за перших спостерігається більш локальність руйнування. Тому вони мають на сьогоднішній день дуже широке застосування [21].

Випробування проведено за умов чистого згину зразків із частотою 1 Гц, навантаження мало синусоїдальну форму циклу з коефіцієнтом асиметрії циклу  $R = 0,8$ . Результати досліджень на циклічну тріщиностійкість (ЦТ) наведено у вигляді кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР). Механічним показником стану вихідних і ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С слугував пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень  $\Delta K_{th}$ .

Результати випробувань цих зразків на ЦТ наведено на рис. 6.

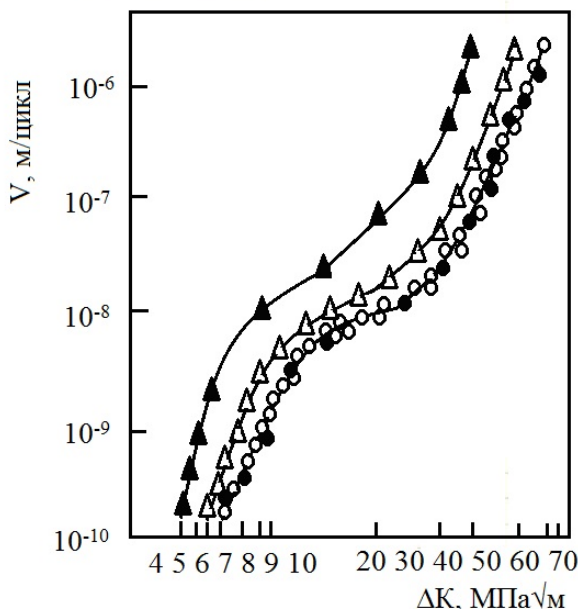
Попередньо визначили значення  $\Delta K_{th}$  матеріалу труби запасу, яке становило ~ 5 МПа $\sqrt{м}$ . Отже, зварювання сприяє його підвищенню. МШ у вихідному стані  $\Delta K_{th} = 6,9$  МПа $\sqrt{м}$  (рис. 6) і не залежить від стану зразків, які під-



білі стовпчики – випробування на повітрі; чорні – у МРВК

Рисунок 5 – Статична тріщиностійкість  $J_{1c}$  МШ (а) і ЗТВ (б) вихідних (А) і ремонтних (Б) зразків 33 сталі 17Г1С

лягали випробуванням, а отримані для них КДВР повністю ідентичні. З переходом до випробувань вихідних, а потім ремонтних зразків 33 значення  $\Delta K_{th}$  відповідно зменшується до 6,1 МПа $\sqrt{м}$  і 4,6 МПа $\sqrt{м}$ . Змінюється характер КДВР: суттєво зростає швидкість росту втомної тріщини (ШРВТ) і зменшуються критичні коефіцієнти інтенсивності напружень  $\Delta K_{fc}$ . Відзначимо, що параметр  $\Delta K_{th}$  більш чутливий до структурних змін ЗТВ, ніж критична величина  $\Delta K_{fc}$ .



білі символи – вихідні;

чорні – ремонтні зразки 33 сталі 17Г1С

Рисунок 6 – КДВР для МШ (○, ●) і ЗТВ (▲, △)

З метою вивчення впливу робочих корозійно-активних середовищ на ЦТ вихідних і ремонтних зразків 33 сталі 17Г1С провели їх

порівняльні випробування на повітрі, у дистильованій воді (рН 6,7) та МРВК (рН 6,5) (рис. 7).

Випробування на ЦТ в різних корозійно-активних середовищах підвищувало ШРВТ порівняно з випробуваннями на повітрі. З підвищенням агресивності середовища (повітря → дистильована вода → МРВК) ЦТ зразків знижувалася. Найбільше зростання ШРВТ спостерігалося за випробувань ремонтних зразків 33 в середовищі МРВК. Порівняно з випробуваннями на повітрі, вона була в 1,3 разів вища. Це свідчить про те, що МТ зазнав спаду загального залишкового ресурсу в 1,3 разів.

Отже, для ЗТВ ремонтних зразків нами встановлена низка нетипових явищ: зниження характеристик  $\sigma_b$  і  $\sigma_{0.2}$  супроводжується спадом пластичності, ударної в'язкості та тріщиностійкості. Такий характер змін типовий для деградованого металу [7] і пов'язаний зі змінами мікроструктури сталі 17Г1С (рис. 2).

Для оцінки надійності 33 трубопроводів необхідно вивчити їх корозійну стійкість [22, 23]. Стаціонарний потенціал  $E_{st}$  визначали відносно хлорид-срібного електрода. За побудованими поляризаційними кривими визначали поляризаційний опір  $R_p$  для матеріалу всіх зон 33. Отримані дані занесені в табл. 2.

З наведених в таблиці даних видно, що поляризаційний опір МШ для зразка у вихідному стані найвищий серед усіх його зон. Тому корозійна стійкість МШ буде набагато вищою, ніж в двох інших зонах – ОМ і ЗТВ.

Проте, слід мати на увазі, що сам поляризаційний опір не здатний однозначно визначати корозійну стійкість зон 33 [1]. За різних електродних потенціалів цих зон корозійна стійкість залежить також від їх взаємної поляризації. У корозійному середовищі різні електродні потенціали утворюють гальванопари. Винятком тут є ОМ. Його площа значно перевищує площі

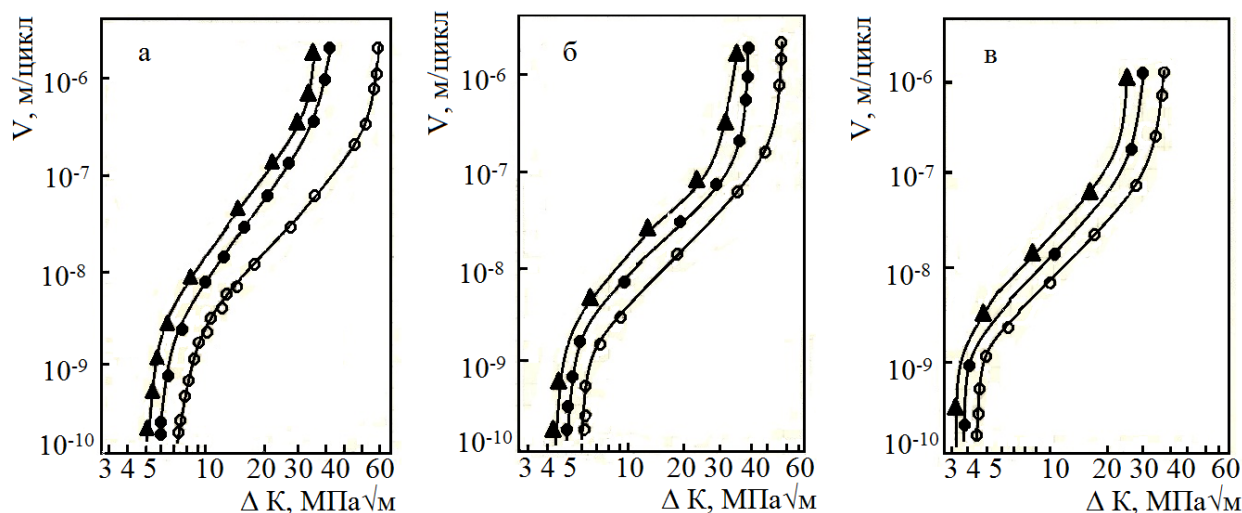


Рисунок 7 – КДВР для МШ (а), ЗТВ вихідних (б) і ремонтних (в) зразків 33 сталі 17Г1С за випробувань на повітрі (о), у дистильованій воді (●) і МРВК (▲)

Таблиця 2 – Поляризаційний опір  $R_p$  і стаціонарний потенціал  $E_{st}$  вихідного та ремонтного зразків 33 сталі 17Г1С

Зони 33 Стан зразка 33	ОМ		ЗТВ		МШ		ЛС
	$R_p$ , Ом·см <sup>2</sup>	$E_{st}$ , V	$R_p$ , Ом·см <sup>2</sup>	$E_{st}$ , V	$R_p$ , Ом·см <sup>2</sup>	$E_{st}$ , V	$E_{st}$ , V
Вихідний	710	-0,465	766	-0,470	1048	-0,445	-0,435
Ремонтний	513	-0,480	634	-0,490	1048	-0,445	-0,445

інших зон, завдяки чому він не поляризується. Тому поляризації підлягають МШ і ЗТВ. При цьому не виключено, що окремо розглядувана зона з вищою корозійною стійкістю кородуватиме у гальванічній парі з іншими зонами 33 інтенсивніше.

Вимірювання електродних потенціалів проводили також в ще одній зоні, яка розміщена між ЗТВ і МШ. Це так звана лінія сплаву (ЛС) площею до 1 мм<sup>2</sup>.

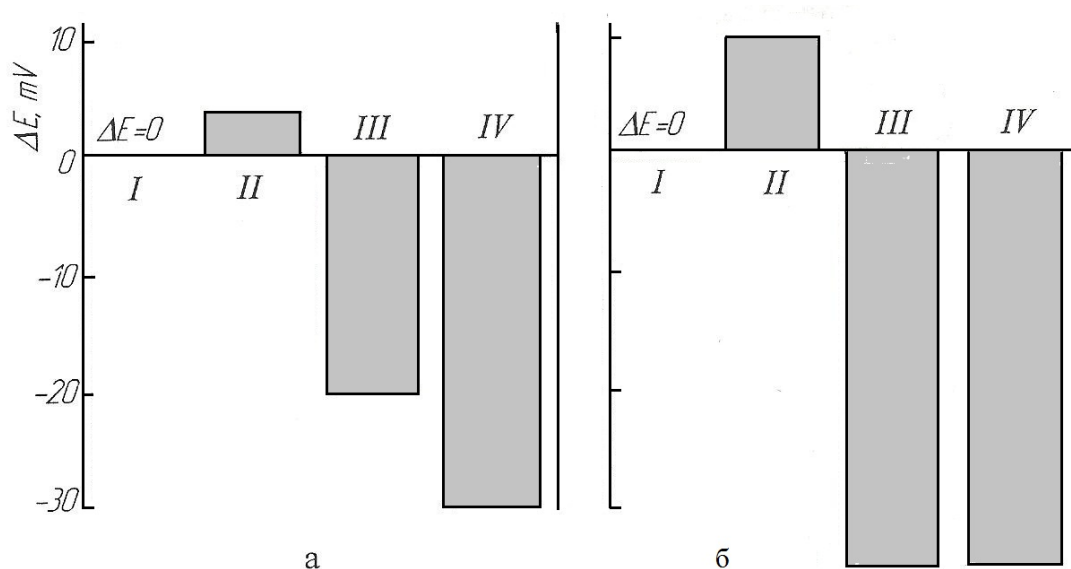
Корозійна стійкість ОМ визначається тільки величиною поляризаційного опору, оскільки він не поляризується (рис. 8). З наведених даних видно, що у вихідних зразках найбільша різниця потенціалів зон 33 становить 0,035 V, а у ремонтних – 0,045V. Тому в другому випадку електрохімічна гетерогенність окремих зон 33 відносно електродних потенціалів є більш суттєвою. Найпозитивніші значення отримано для ЛС обох типів зразків і МШ ремонтних зразків, найвід'ємніші – для зон ЗТВ обох типів зразків. Відповідно у позитивний бік поляризуються ЗТВ обох типів зразків, а у від'ємний бік – зони МШ і ЛС цих же зразків. Анодна поляризація ЗТВ інтенсифікуватиме анодні реакції та гальмуватиме катодні, а катодна поляризація МШ і ЛС, навпаки, пришвидшуватиме на них катодні реакції і гальмуватиме анодні. МШ властивий високий рівень поляризаційного опору. Якщо врахувати ще й позитивний вплив катодної поляризації, то його корозійна стійкість зростає. Незважаючи на те, що поляризаційний опір металу ЗТВ вищий за ОМ, негативний вплив на нього анодної поляризації понизить його коро-

зійну стійкість. Тобто, саме на ЗТВ інтенсифікуватиметься корозія. Збільшення часу експлуатації МТ підвищує небезпеку появи вибіркової корозії ЗТВ.

Відомо, що катодний процес супроводжується виділенням водню [24], а це загрожує наводнюванням металу у катодно поляризованих зонах 33. Згідно отриманих результатів дослідження слід сподіватися, що найсильніше наводнювання отримає матеріал ЛС. За можливої додаткової вибіркової корозії ЗТВ наводнювання сприяє утворенню корозійних каверн в ділянці ЛС, що призводить, як правило, до водневого окрихчення сталі та зародження мікротріщин. Подальше поширення тріщин від ЛС буде залежати від того, який із зон МШ чи ЗТВ властивий найнижчий опір крихкому руйнуванню.

Наводнювання суттєво погіршує фізико-механічні та електрохімічні властивості трубних сталей і сприяє їхній деградації. Попередня пластична деформація (ППД) підсилює чутливість трубних сталей до водневої крихкості (ВК). Це пов'язано з тим, що деформація розриває захисні плівки поверхні металу. Оголена сталь отримує можливість більш інтенсивно наводнюватись. Ці питання уже вивчені до певної міри для матеріалів і 33 магістральних НПП [1, 2, 7, 16, 17, 24], однак для зон ремонтних 33 такі дослідження зовсім не проводилися.

Наводнювання зразків проводилось за різної густини струму катодної поляризації в електрохімічній комірі, яка охоплювала їх робочу частину. Використовували водні розчини H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> з різною наводнювальною здатністю: рНІ з до-



I – ОМ; II – ЗТВ; III – МШ; IV – ЛС

Рисунок 8 – Поляризація різних зон 33 сталі 17Г1С у вихідних (а) і ремонтних (б) зразках

даванням 2 г/л інгібітора корозії – триполіфосфату та рН0 з додаванням 2 г/л інгібітора корозії та стимулятора наводнювання – тіосечовини. Послідовність наводнювання та навантаження проводили за п'ятьма схемами, розробленими в роботі [25].

Формально визначене відносне видовження зразка виявилось малоінформативним для оцінки ВК, спричиненої множинним розтріскуванням наводнюваного зразка за пластичного деформування. Тому тільки відносне звуження слід вважати найінформативнішим показником схильності 33 до ВК, яку оцінювали за коефіцієнтом  $K_{\psi} = \psi^H / \psi$ , де  $\psi^H$  і  $\psi$  – відносне звуження наводнених і ненаводнених зразків відповідно. Після металографічного аналізу профілів зламу 33 встановлено, що в усіх випадках воно руйнувалося в зоні ОМ.

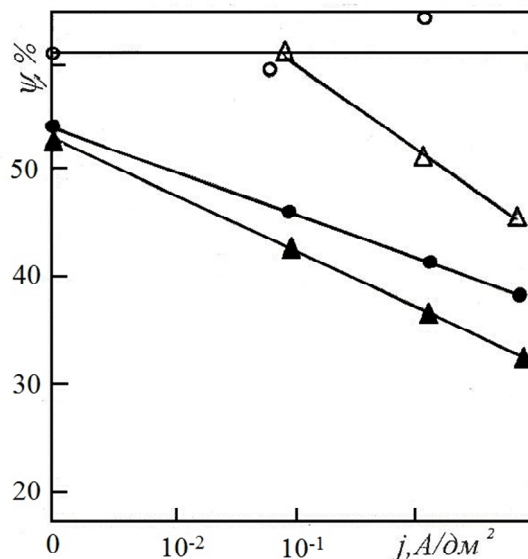
В роботі використані результати виконаних раніше досліджень з наводнювання 33 труб запасу [25 – 27], в яких приймав участь к.т.н. Тараєвський О.С.

Проведена порівняльна оцінка впливу попереднього електролітичного наводнювання (ПЕН) на механічні властивості металу ЗТВ вихідних і ремонтних зразків 33 сталі 17Г1С.

Згідно першої схеми зразки ПЕН протягом однієї години і кожні 5 хв. навантажували на повітрі до руйнування.

Вихідні зразки 33 сталі 17Г1С показали повну відсутність чутливості параметра  $\psi$  до ПЕН в розчині з рН1. За всіх значень густини струму поляризації коефіцієнт  $K_{\psi} = 1$ .

Коли ПЕН виконувалось в агресивнішому середовищі з рН0, то за густини струму поляризації  $>0,1$  А/дм<sup>2</sup> пластичність зазнала помітного спаду і за  $J = 10$  А/дм<sup>2</sup> значення  $K_{\psi} = 0,74$ . Зростання густини струму поляризації для ремонтних зразків призводить до постійного спаду показника  $\psi$ . У розчині з рН1  $K_{\psi}$  зменшився до 0,73, а у розчині з рН0 – до 0,6.



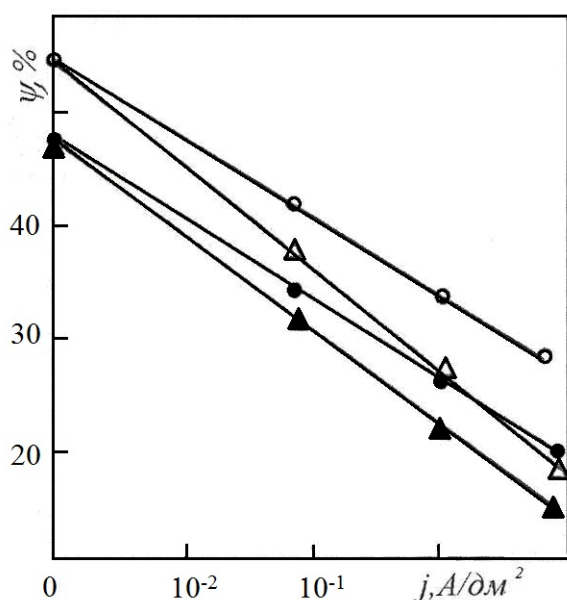
вихідні (білі) та ремонтні (чорні символи) зразки; о, • – рН 1; Δ, ▲ – рН 0

Рисунок 9 – Вплив ПЕН і рН середовища на  $\psi$  33 сталі 17Г1С

Згідно з другою схемою зразки ПЕН впродовж однієї години, продовжуючи наводнення, піддавали розтягу до руйнування. Додаткове наводнювання під навантаженням як вихідних, так і ремонтних зразків 33 сталі 17Г1С призводить до сильного окрихнення матеріалу (рис. 10).

Окрихнення металу ремонтних зразків проявило себе більш інтенсивно, ніж окрихнення металу вихідних зразків. Так, для розчинів з рН1 і рН0 за густини поляризації 10 А/дм<sup>2</sup> для вихідних зразків значення  $K_{\psi}$  становили 0,54 і 0,37. За таких же умов для ремонтних зразків величини  $K_{\psi}$  становили відповідно 0,42 і 0,26.





вихідні (білі) та ремонтні (чорні символи) зразки; о, ● – рН 1; Δ, ▲ – рН 0

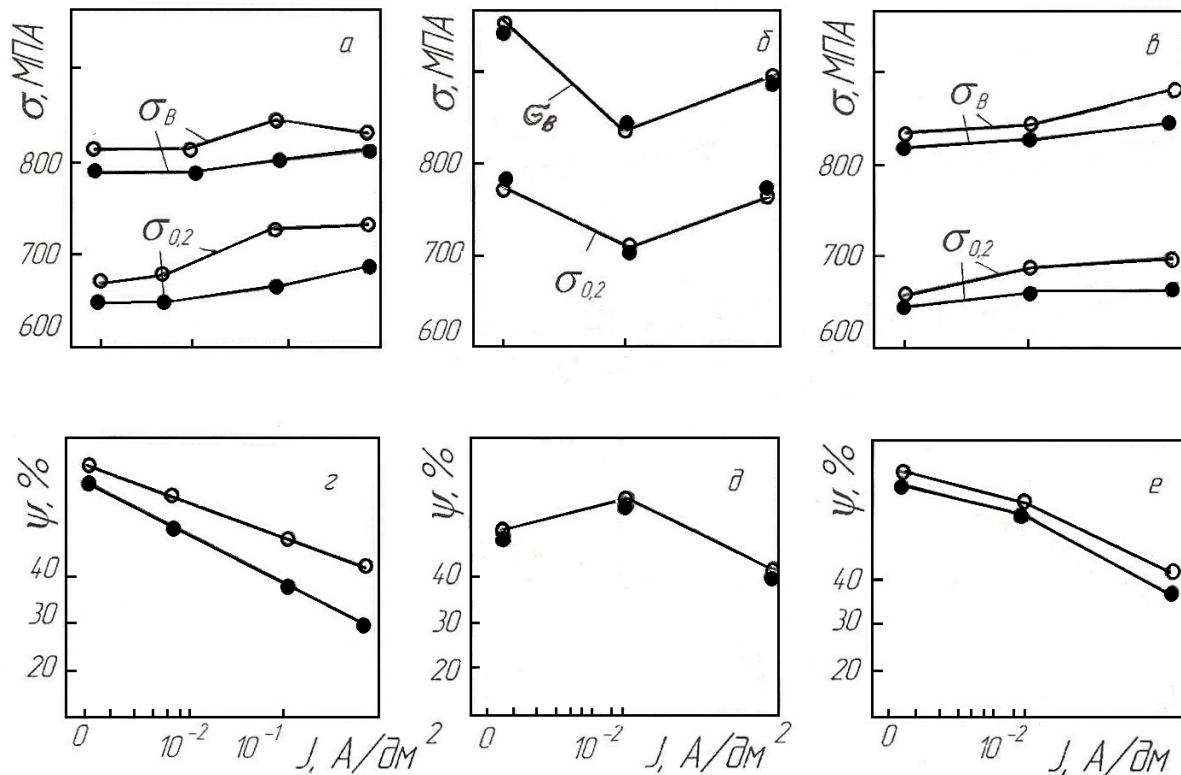
Рисунок 10 – Вплив наводнювання під час навантаження і рН середовища на  $\psi$  33 сталі 17Г1С

З наведених вище результатів досліджень видно, що короточасна поляризація за активного навантаження зразків дає набагато яскравіший ефект, ніж одноденне ПЕН. Це переконливо свідчить про різні механізми абсорбу-

вання водню навантаженим і ненавантаженим металом. Під час навантаження відбувається руйнування поверхневих захисних плівок на сталі, і оголений метал інтенсивніше абсорбує водень. Розчинність водню в розтягненій сталі зростає. Якщо ж сталь – пластично деформована, то одночасно з дифузійним діє й дислокаційне перенесення водню. Деформована поверхня сприяє утворенню нових центрів абсорбції, що полегшує проникнення водню в метал.

Друга схема наводнення та навантаження застосовувалась і під час випробувань розтягом зразків із виточкою. Виточка є концентратором напружень, що утруднює пластичну деформацію. Тому показники міцності 33 для зразків з виточкою були вищі, ніж для гладких. Вони наведені для нетто площі (рис. 11), тож можуть застосовуватися тільки для порівняльних оцінок різних зон 33.

З рис. 11 а, г видно, що механічні характеристики ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$  і  $\psi$ ) ОМ ремонтних зразків нижчі за відповідні показники вихідних зразків. Цього і слід було сподіватися. Адже ОМ вихідних зразків – це неексплуатована трубна сталь 17Г1С, а ремонтних зразків – ця ж сталь після 31 року експлуатації. За наводнювання під час навантаження характеристики міцності  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$  з ростом густини струму повільно зростають, а зі збільшенням пластичності – зменшуються. Оскільки  $K_\psi$  для вихідних зразків становило 0,68, а для ремонтних – 0,51, то останні мають вищу чутливість до крихкого руйнування під дією водню.



а, г – ОМ; б, д – 3Ш; в, е – 3ТВ

Рисунок 11 – Вплив наводнювання під час навантаження на характеристики міцності (а-в) та пластичності (г-е) різних зон 33 вихідних (о) та ремонтних (●) зразків з виточками сталі 17Г1С

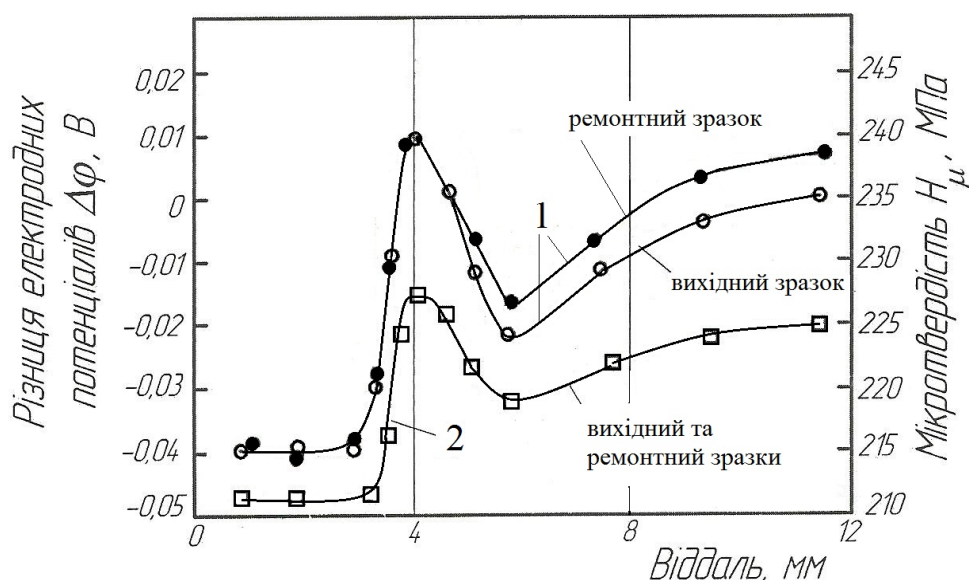


Рисунок 12 – Розподіл різниці електродних потенціалів (1) і мікротвердості (2) для металу вихідного та ремонтного зразків 33 сталі 17Г1С

Ненаводнений метал ЗШ (рис. 11 б, д) мав найвищі показники міцності ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) і найнижчий показник пластичності  $\psi$  серед усіх зон ЗШ. Всі ці параметри як для вихідних зразків, так і ремонтних майже не відрізнялися.

Наводнювання за густини струму  $0,01 \text{ А/дм}^2$  сприяє пластифікації МШ: показники міцності  $\sigma_b$  і  $\sigma_{0,2}$  спадають, а пластичність  $\psi$  зростає. Підвищення густини струму призводить до зворотньої тенденції – зростання величини  $\sigma_b$  і  $\sigma_{0,2}$  і спаду  $\psi$ . Тобто, пластифікація МШ переходить до його окрихчення.

Ненаводнений матеріал ЗТВ має практично однакові значення характеристик міцності  $\sigma_b$  і  $\sigma_{0,2}$  та пластичності  $\psi$  з ОМ (рис. 11). Аналогічними були також тенденції до їх змін за наводнювання під навантаженням.

Аналіз результатів досліджень свідчить, що найчутливішими до окрихчення металу абсорбованим воднем є ОМ і ЗТВ (рис. 11 г і е). Однак, якщо в першому випадку для ремонтних зразків  $K_\psi$  становило  $0,51$ , то в другому –  $0,67$ . Тобто ЗТВ ремонтних зразків менш чутлива до крихкого руйнування під дією водню, ніж зона ОМ. Це ж стосується ЗТВ вихідних зразків, оскільки для них  $K_\psi = 0,64$ .

Суть третьої схеми наводнювання та навантаження полягає ось у чому. Зразок навантажували на повітрі до певного рівня пружної чи пластичної деформації, ПЕН одну годину за такого рівня навантаження з подальшим руйнуванням на повітрі.

Зразки з виточкою наводнювали 1 год. під навантаженням за пружних деформацій ( $\sigma = 200$  і  $400 \text{ МПа}$ ) та після пластичної деформації ( $480 \text{ МПа}$ ). Проведення ПЕН зразків, навантажених в області пружних деформацій, знижує пластичність металу при його руйнуванні. З підвищенням напружень ця тенденція відчутніша. Для вихідних зразків отримали  $K_\psi = 0,87$  і  $0,78$  відповідно при  $200$  і  $400 \text{ МПа}$ , а для ремонтних зразків ці показники були  $0,85$  і  $0,76$ .

Під час транспортування труб, монтажу трубопроводів, зсувів ґрунтів тощо в МТ можуть виникати напруження вищі границі пластичності (в нашому випадку  $\sigma = 480 \text{ МПа}$ ). Наводнювання зразків у таких умовах підсилює ВК металу ЗШ. Так, для вихідних зразків отримали  $\psi_\psi = 0,61$ , а для ремонтних –  $0,57$ .

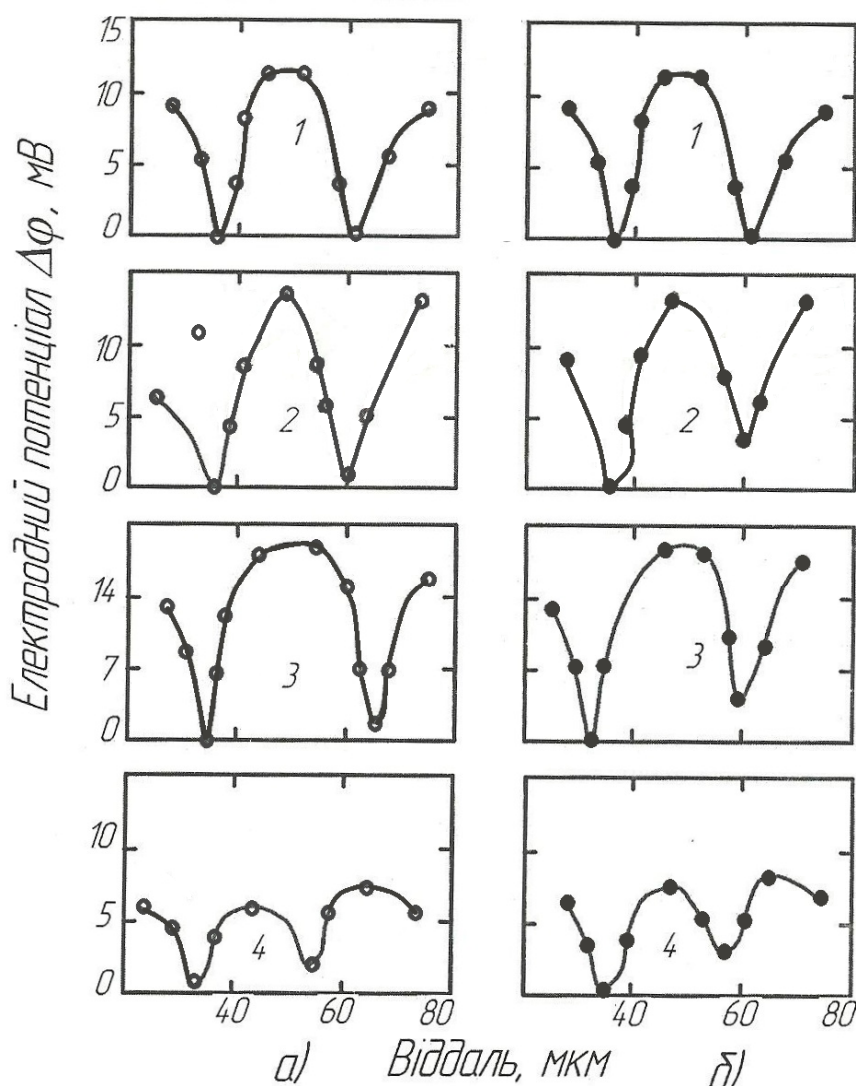
Згідно з четвертою схемою наводнювання та навантаження зразок навантажується на повітрі до певної пластичної деформації, розвантажується, наводнюється і доводиться до руйнування на повітрі. Навантаження на повітрі проводилось до напружень  $480$  і  $520 \text{ МПа}$ . За більш інтенсивного навантаження ефект ВК проявляється сильніше. Для вихідних зразків отримали  $K_\psi = 0,73$  і  $0,57$ , а для ремонтних  $K_\psi = 0,67$  і  $0,49$  відповідно.

Випробування за п'ятою схемою наводнювання та навантаження відбувалося спочатку за четвертою схемою, однак повторне навантаження зразка до руйнування проводилось не припиняючи наводнювання. П'ята схема випробувань проявила себе найчутливішою до ВК зразків ЗШ сталі 17Г1С. Найінтенсивніше окрихчення отримали за напружень  $520 \text{ МПа}$ . Для вихідних зразків  $K_\psi$  становило  $0,30$ , а для ремонтних  $K_\psi = 0,23$ .

Отже, за використання всіх п'яти схем навантаження та наводнювання матеріал ЗТВ ремонтних зразків ЗШ сталі 17Г1С проявив себе більш чутливим до ВК порівняно з матеріалом ЗТВ вихідних зразків.

Під час оцінки якості ЗШ слід приділяти належну увагу визначенню електрохімічної гетерогенності їх поверхні, за якою легко судити про схильність ЗШ до корозійного руйнування.

Розподіл мікротвердості та різниці електродних потенціалів для металу вихідних і ремонтних зразків ЗШ сталі 17Г1С проілюстрований на рис. 12. Найбільша електрохімічна неоднорідність обох типів зразків становить приблизно  $50 \text{ мВ}$ , а зміни показника  $\Delta\phi$  в межах



а - вихідний зразок; б - ремонтний зразок  
1 - МШ; 2 - ЛС; 3 - ЗТВ; 4 - ОМ

Рисунок 13 – Розподіл мікроелектродних потенціалів у різних зонах ЗЗ

МШ ідентичні. В сторону від МШ до ОМ, тобто в ЗТВ, характеристика  $\Delta\phi$  для ремонтного зразка зсунута вгору по відношенню до вихідного зразка. Це свідчить про окрихчення матеріалу та підвищення його схильності до корозійного руйнування.

Мікротвердість і електродні потенціали різних зон ЗЗ залежать від структурно-хімічної неоднорідності металу і мають такий же аналогічний характер розподілу. Однак мікротвердості всіх зон ЗЗ мають однакові значення, тому за ними не можна прогнозувати поведінку трубних сталей у ході подальшої експлуатації.

Всім зонам ЗЗ властива мікроелектрохімічна неоднорідність. Розподіл у них мікроелектродних потенціалів наведений на рис. 13 ЗТВ і ЛС володіли найбільшою мікроелектрохімічною гетерогенністю, а ОМ – найменшою.

В подальшому планується вивчити вплив попереднього пластичного деформування та наводнювання на статичну і циклічну тріщиностійкість ЗЗ трубопроводів.

## Висновки

1. Відповідальними за руйнування зварних з'єднань є дефекти наводнюваних ділянок, звідки починаються корозійні процеси.

2. Аналіз конструкції зварних з'єднань нафтогазопроводів вказав на доцільність використання у дослідженнях зразків двох типів: 1 – вихідних зразків (зварне з'єднання двох неексплуатованих труб), 2 – ремонтних зразків (зварне з'єднання катшки труби запасу з експлуатованою трубою).

3. Структури МШ обох типів зразків не виявили ніякої різниці між собою. Проте в сусідній ЗТВ мікроструктура стовпчастих кристалітів, властива цьому матеріалу, для ремонтних зразків була більш крупнозернистою порівняно із вихідними зразками.

4. Виявлено аномалію у механічній поведінці матеріалу ЗТВ ремонтних зразків, яка властива деградованим сталям. Вона проявляється в зниженні твердості НВ, параметрів міцності  $\sigma_B$  і

$\sigma_{0,2}$  за одночасного зменшення відносного зрушення  $\psi$ , ударної в'язкості KCV та статичної тріщиностійкості  $J_{1c}$ . ЗТВ ремонтних зразків ЗЗ є найбільш чутливою до спаду  $J_{1c}$  під дією робочого середовища (модельного розчину водного концентрату). Встановлено, що МШ у вихідному стані має  $K_{th} = 6,9 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ . З переходом до випробувань вихідних, а потім ремонтних зразків ЗЗ значення  $\Delta K_{th}$  відповідно зменшується до  $6,1 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  і  $4,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ . Змінюється характер КДВР: суттєво зростає швидкість росту втомної тріщини і зменшуються значення  $\Delta K_{fc}$ . З підвищенням агресивності середовища циклічна тріщиностійкість зразків знижувалася. Найбільше зростання швидкості росту втомної тріщини спостерігалось під час випробувань ремонтних зразків в агресивних середовищах. В той час, як механічні характеристики МШ обох типів зразків не відрізнялися, метал ЗТВ ремонтних зразків окрихчувався найінтенсивніше.

5. Визначенням поляризаційного опору, стаціонарного потенціалу та вивченням взаємної поляризації різних зон ЗЗ сталі 17Г1С встановлено, що саме на ЗТВ ремонтного зразка найбільше інтенсифікуватиметься корозія. Збільшення часу експлуатації МТ підвищує небезпеку появи тут додаткової вибіркової корозії.

6. За використання різних схем навантаження та наводнювання дослідних зразків встановлено, що матеріал ЗТВ ремонтних зразків ЗЗ сталі 17Г1С проявив себе більш чутливим до водневого окрихчення порівняно з матеріалом ЗТВ вихідних зразків.

7. Вивченням електрохімічної гетерогенності поверхні ЗЗ показано підвищене окрихчення матеріалу ЗТВ ремонтних зразків та зростання його схильності до корозійного руйнування.

### Література

1 Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та їх запобігання: науково-технічний посібник у 3-х т.: Основи оцінювання деградації трубопроводів / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2011. – 445 с.

2 Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: Спалом, 2009. – 504 с. Т.11: Міцність і довговічність нафтогазових трубопроводів і резервуарів / Г.М. Никифорчин, С.Г. Поляков, В.А. Черватюк [та ін.] / Під ред. Г.М. Никифорчина.

3 Кузьменко Ю. Сучасні вимоги до надійності та безпеки магістральних трубопроводів / Ю. Кузьменко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. – Спецвипуск № 4. – Т. 1. – С.373 – 375.

4 Банахевич Ю.В. Діагностування напруженого стану магістральних нафтогазопроводів в околі стикових зварних з'єднань та корозійних пошкоджень розрахунково-експериментальним методом: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.13

"Нафтогазопроводи, бази та сховища" / Ю.В. Банахевич. – Івано-Франківськ, 2003. – 19 с.

5 Драгіляєв А.В. Визначення залишкових напружень і оцінка їх впливу на довговічність трубопроводів в зоні кільцевих зварних з'єднань: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.13 "Нафтогазопроводи, бази та сховища" / А.В. Драгіляєв. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2006. – 18 с.

6 Іванчук О.О. Діагностування напруженого стану і оцінка запасу міцності кільцевих зварних з'єднань стиків різнотовщинних труб магістральних нафтогазопроводів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.13 "Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища" / О.О. Іванчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – 20 с.

7 Петрина Д.Ю. Вплив експлуатаційної деградації матеріалів і зварних з'єднань магістральних нафтогазопроводів на їх працездатність: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.05.13 "Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища" / Д.Ю. Петрина. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – 36 с.

8 Мазур И.И. Безопасность трубопроводных систем / И.И. Мазур, О.М. Иванцов. – М.: Центр ЕЛИМА, 2004. – 1096 с.

9 Вышемирский Е.М. Состояние и основные направления развития сварочного производства ОАО "Газпром" // Сварка и диагностика. – 2009. – № 1. – С.16-19.

10 Сварочно-монтажные работы в трубопроводном строительстве [Тенст]: учебное пособие для вузов / А.Ф. Суворов, Г.Г. Васильев, Ю.А. Горянков [и др.]. – М.: ЗАО Звезда, 2006. – 240 с.

11 Галкин В.А. Опыт разработки современных отечественных технологий и оборудования для механизированной сварки магистральных газопроводов / В.А. Галкин, А.Л. Латинцев, Д.Г. Будевич // Сварка и диагностика. – 2011. – № 2. – С.37-43.

12 Гецник О.Б. Воспроизводимость качества сварных соединений при автоматической орбитальной сварке с управляемым каплепереносом электродного металла / О.Б. Гецник, Б.Л. Гецник, С.И. Полосков // Сварка и диагностика. – 2009. – № 2. – С. 47-53.

13 Хоменко В.И. Новая высокопроизводительная технология комбинированной сварки магистральных трубопроводов большого диаметра / В.И. Хоменко, А.Я. Сударнин, С.И. Кучук-Яценко // Мир сварки. – 2010. – № 4. – С. 32-37.

14 Шелягин В.Д. Перспективы применения лазерной и гибридной технологий сварки сталей для повышения эксплуатационного ресурса трубопроводов / В.Д. Шелягин, Ю.Ю. Хаскин, А.Б. Бернацкий // Автоматическая сварка. – 2010. – № 10. – С. 37-40.

15 Панчук В.М. Сучасні технології зварювання магістральних нафтогазопроводів / М.В. Панчук, Л.С. Шлапак, О.М. Матвієнків, О.Л. Козак // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2011. – № 3 (29). – С. 24-29.

16 Цирульник О.Т. Деградація властивостей металу зварного з'єднання експлуатованого магістрального газопроводу / О.Т. Цирульник, В.А. Волошин, Д.Ю. Петрина [та інші] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – № 5. – С. 55-59.

17 Петрина Д.Ю. Оцінювання деградації зварних з'єднань сталі 17Г1С магістрального трубопроводу / Д.Ю. Петрина // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2010. – № 3 (25). – С. 76-85.

18 Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие в 4 т. / Под общ. ред. Панасюка В.В. / С.Е. Ковчин, Е.М. Морозов. – К.: Наукова думка, 1998. – 436 с.

19 Відомчі будівельні норми України : ВБН В. 2.3-00018201.04 – трубопроводів з дефектами. – К.: Держнафтогазпром, 2000. – 57 с. – т. 3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения.

20 ДСТУ – НБВ. 2.3.21: 2008. Настанова визначення залишкової міцності магістральних трубопроводів з дефектами. – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 68 с.

21 Механика разрушения и прочность материалов : Справ. пособие в 4 т. / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин [и др.]; под общ. ред. Панасюка В.В. – К.: Наукова думка, 1990. – 680 с. – т. 4: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов.

22 Detecting Internal Corrosion of Natural Gas Transmission Pipelines : Field Tests of Probes and Systems for Real-time Corrosion Measurement / B.S. Covino, Jr.S.J. Bullard, S.D. Cramer // Proc/ of 16<sup>th</sup> Intern. Corrosion Conference, Beijing, China, Sept. 19-24, 2005. – P. 4-17.

23 Lunarska E. Monitorowanie zagrozenia korozja i nawodorowaniem instalacji przemyslowych / E. Lunarska, K. Nikiforow, J. Pyrza // Ochrona przed korozja. – 2001. - № 12. – S. 315-322.

24 Effect of the long-term service of the gas pipeline on the properties of the ferrite – pearlite steel / H. Nykyforchyn, E. Lunarska, O. Tsyrylnyk, [et al.] // Materials and corrosion. – 2009. - № 9. – P. 716-725.

25 Чутливість водневої крихкості зварного з'єднання сталі 17Г1С магістрального газопроводу / О.Т. Цирульник, Є.І. Крижанівський, Д.Ю. Петрина [та ін.] // Фіз.-хім. механіка металів. – 2004. – № 6. – С. 111-114.

26 Крижанівський Є.І. Вплив наводнення на корозійно-механічні властивості зварних швів газопроводів / Є.І. Крижанівський, О.С. Тараєвський, Д.Ю. Петрина // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 1 (14). – С. 29-34.

27 Петрина Д.Ю. Схильність зварного з'єднання магістрального газопроводу до водневої крихкості / Д.Ю. Петрина, О.С. Тараєвський, Д.С. Вуйцік : Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів ["Зварювання та сучасні технології"], Київ, 25-27 травня 2005 р. – К.: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2005. – С. 110.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*23.01.13*

*Рекомендована до друку*

*професором Грудзом В.Я.*

*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*

*професором Гевком Б.М.*

*(Тернопільський державний університет імені І. Пулюя)*