

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. КАРПЕНКА**

УСОВ
Дмитро Ігорович



УДК 620.193.4: 620.197.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ТРИВАЛО ЕКСПЛУАТОВАНИХ АНОДНИХ ЗАЗЕМЛЮВАЧІВ
УСТАНОВОК КАТОДНОГО ЗАХИСТУ ТРУБОПРОВІДІВ**

05.17.14 – Хімічний опір матеріалів та захист від корозії

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Східноукраїнському національному університеті ім. В. Даля, м. Сєверодонецьк

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

АРХИПОВ Олександр Геннадійович,

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” МОН України, професор кафедри космічної інженерії

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

НИКИФОРЧИН Григорій Миколайович

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, провідний науковий співробітник відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів

кандидат технічних наук

МЕРЦАЛО Іванна Павлівна,

Національний університет “Львівська політехніка” МОН України, завідувач навчально-наукової лабораторії кафедри хімії і технології неорганічних речовин

Захист відбудеться 5 травня 2021 р. о 16⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.226.02 Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України за адресою: 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, 79060, Львів, вул. Наукова, 5 та на сайті www.ipm.lviv.ua.

Автореферат розісланий 3 квітня 2021 року

Учений секретар спеціалізованої вченої ради, доктор технічних наук, професор



І. М. Погрелюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В Україні є одна з найрозгалуженіших мереж транзитних нафтогазопроводів Європи, більша частина з яких вже вичерпала свій плановий ресурс. Корозійний чинник вважають головним у порушенні цілісності тривало експлуатованих трубопроводів, тому продовжити їх ресурс протикорозійним захистом – пріоритетне завдання. Для цього поєднують пасивний (ізоляційні покриття) та активний (катодною поляризацією) захист. Ефективність катодного захисту суттєво залежить від роботи анодних заземлювачів, оскільки основні втрати потужності припадають найчастіше на них. Під час експлуатації заземлювачі зношуються та втрачають масу, через що знижується їх довговічність. Крім того, поступово збільшується електричний опір між ними та ґрунтом, а отже погіршуються їх функціональні властивості та виникає потреба монтувати додаткові заземлювачі у системі катодного захисту.

Економічно вигідно виготовляти заземлювачі зі заздалегідь експлуатованих сталевих труб транспортування вуглеводнів, які з різних причин відбракували. Фізико-механічні та фізико-хімічні властивості таких сталей, а також їх електрохімічні характеристики можуть суттєво змінюватися порівняно з неексплуатованим металом. Цим питанням присвячені праці Л. І. Ниркової, М. С. Хоми, І. М. Дмитраха, Г. М. Никифорчина, О. Г. Архипова, W. Ваеєкменн та інш. Однак недостатньо досліджено вплив експлуатаційних змін металу на функціональні та механічні властивості заземлювачів з тривало експлуатованих трубних сталей. Необхідно детально вивчити вплив катодного захисту на експлуатаційну деградацію трубних сталей та розробити методи підвищення ефективності діючих та нових сталевих анодних заземлювачів, які були б ефективними впродовж тривалої експлуатації.

Отже, встановити закономірності деградації трубних сталей в умовах катодного захисту та її вплив на роботоздатність анодних заземлювачів упродовж тривалої експлуатації, а також розробити методи підвищення ефективності їх роботи та продовжити ресурс – важливе науково-технічне завдання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Роботу виконано у Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля у межах бюджетної теми «Корозійний моніторинг та визначення залишкового ресурсу обладнання хімічних виробництв» (№ держреєстрації 0116U008702, 2016 – 2018 р.) згідно з тематичними планами Міністерства освіти і науки України, а також низки госпдоговорів, в яких автор брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи – встановити електрохімічні особливості та закономірності деградації сталей трубопроводів ферито-перлітного та аустенітного класів в умовах катодного захисту, визначити стан анодних заземлювачів упродовж тривалого терміну експлуатації, а також розробити методи підвищення ефективності їх роботи та продовження ресурсу використанням активних речовин.

Для досягнення поставленої мети слід розв'язати такі завдання:

1. Встановити особливості експлуатаційної деградації ферито-перлітної сталі 20 трубопроводу в умовах його катодного захисту.
2. Оцінити вплив тривалої експлуатації анодних заземлювачів з ферито-перлітної сталі 20 на її структуру, швидкість корозії, електрохімічні та механічні властивості.
3. Вияснити можливість застосування анодних заземлювачів з корозійнотривкої сталі.
4. Вивчити вплив активних речовин на зменшення електричного опору в системі анод– ґрунт та властивості анодів.
5. Розробити конструкцію анодного заземлювача щоб продовжити його ресурс та поліпшити функціональні властивості.

Об'єкт дослідження: корозія та деградація сталей трубопроводів в умовах катодного захисту та їх повторне використання для анодних заземлювачів.

Предмет дослідження: закономірності зміни властивостей сталей анодних заземлювачів за тривалої експлуатації та методи підвищення їх ефективності.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань використовували такі методи експериментальних досліджень: електрохімічний та гравіметричний; визначали хімічний склад металу та кількість залишкового водню; оцінювали електричний опір в системі анод–ґрунт; металографічний аналіз структури та механічні випробування з визначенням твердості, характеристик міцності і пластичності, ударної в'язкості,

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше виявлено експлуатаційне збільшення частки фериту через розпад перліту вуглецевої сталі 20 за катодного захисту трубопроводу, внаслідок чого суттєво знижується опір корозії металу у хлоридному водному розчині (в 1,6 рази нижчий, ніж сталі у вихідному стані), що супроводжується підвищенням концентрації водню (більш, ніж на порядок).

2. Розроблено новий, захищений патентом України, метод підвищення ефективності роботи анодних заземлювачів зі сталевих труб застосуванням активаторів, що дало можливість знизити та стабілізувати опір системи анод–ґрунт. Встановлено, що найефективнішим активатором є NaCl, під час використання якого упродовж 23 місяців електричний опір анода зі сталі 20 та ґрунту є нижчим на ~ 60%, а опір корозії – на ~ 20% порівняно з анодом без активатора.

3. Вперше показано перевагу використання як анодних заземлювачів заздалегідь експлуатаційно деградованих труб, які проявляють підвищену струмовіддачу, що частково компенсує зростання опору в системі анод– ґрунт під час тривалої експлуатації заземлювачів.

4. Розроблено захищену патентом України конструкцію анодного заземлювача на основі сталевий труби, яка дає можливість контролювано зменшувати опір в системі анод–ґрунт періодичним введенням водних розчинів, через що підвищується ефективність його роботи.

5. Виявлено експлуатаційне підвищення корозійної тривкості та зниження схильності до пітингоутворення заземлювачів, виготовлених зі сталі аустенітного класу 12X18H10T, що забезпечуватиме великий ресурс роботи, однак, вимагатиме більшої кількості труб-анодів через їх меншу струмовіддачу.

Практичне значення одержаних результатів.

На основі електрохімічних підходів обґрунтовано ефективність використання тривало експлуатованих труб з вуглецевих ферито-перлітних сталей для виготовлення заземлювачів установок катодного захисту трубопроводів, що дало змогу зменшити негативний вплив підвищення опору в системі анод–грунт та підвищити енергоефективність катодного захисту.

Для підвищення енергоефективності та ресурсу роботи анодних заземлювачів з вуглецевих ферито-перлітних сталей під час тривалої експлуатації запропоновано метод введення активаторів та розроблено нову конструкцію анодного заземлювача, на які отримано патенти України.

Результати досліджень впроваджено у ПП «Будремсервіс» під час виготовлення та обслуговування сталевих анодних заземлювачів для підвищення їх ефективності та ресурсу експлуатації.

Особистий внесок здобувача. Основні експериментальні результати та узагальнення, які становлять суть дисертації, отримані та сформульовані автором самостійно: аналіз літературних джерел, реалізація експериментів, порівняльний аналіз та узагальнення, розроблення та впровадження в експлуатацію експериментальної моделі заземлювача, отримання числових результатів з експлуатації експериментального заземлювача. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать: дослідження деградації анодних заземлювачів зі сталі 20 [1], виконання експериментів з визначення ступеня деградації сталі трубопроводу після експлуатації в умовах катодного захисту [2, 3, 13, 14], розроблення конструкції анодного заземлювача тривалої експлуатації [4, 10–12], дослідження анодних заземлювачів після експлуатації з хімічно-активними речовинами [5–9], визначення можливості застосування анодних заземлювачів з нержавкої сталі [8].

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались і обговорювались на: XIV Міжнародній конференції «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів» (Львів, 2018 р.); XX Міжнародній науково-технічній конференції «Технологія–2017», (Сєверодонецьк, 2017 р.); XIX Міжнародній науково-технічній конференції «Технологія–2016» (Сєверодонецьк, 2016 р.); Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Перспективи розвитку нафтогазової галузі» (Кореїз, Крим, 2010 р.).

Дисертаційна робота в повному обсязі доповідалася та обговорювалася на наукових семінарах Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, Сєверодонецьк (керівник семінару – завідувач кафедри машинобудування та прикладної механіки, д.т.н., проф. В. І. Соколов) та Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України (Львів) «Проблеми корозії та протикорозійного

захисту металів” (керівник семінару – чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф. М. С. Хома).

Публікації. Основні результати досліджень, які відображені в дисертації, опубліковані у 14 наукових працях. Серед них: 8 праць – у наукових фахових виданнях [1–8], з яких одна [1] внесена до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science; 2 – патенти України, 4 – у збірниках тез та матеріалів конференцій [11–14].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена на 158 сторінках машинописного тексту, складається із анотації, вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та п’яти додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає – 128 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 70 рисунками та 18 таблицями. Список використаних джерел містить 125 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано науково-технічну актуальність дисертаційної роботи, показано її зв’язок з науковою темою, сформульовано мету та задачі роботи, зазначено її наукову новизну та практичну значущість, вказано особистий внесок здобувача, викладено інформацію про апробацію результатів роботи, публікації та структуру дисертації.

У першому розділі наведено огляд літературних даних про методи та засоби захисту трубопроводів від корозії. Розглянуто та проаналізовано специфіку застосування катодного захисту з різними типами анодних заземлювачів. На основі опрацьованих літературних результатів сформульовано завдання досліджень та напрямки їх розв’язання.

У другому розділі подана характеристика досліджуваних матеріалів та модельних середовищ, описано обладнання та методики виконання експериментів.

Об’єкт досліджень: ферито-перлітна трубна сталь 20 та нержавка 12X18H10T у вихідному стані та після різних термінів експлуатації.

Випробовували сталь 20 після 51 року експлуатації на газопроводі високого тиску за катодного захисту потенціалом $\sim -0,68$ В відносно мідносульфатного електрода порівняння. Зразки вирізали з труб на різній відстані L від катодної станції (0,5; 8 та 15 км), а також, для порівняння, з труби запасу.

Досліджували сталь 20 анодних заземлювачів, виготовлених з експлуатованої 20 років труби і експлуатованих в установках катодного захисту трубопроводу 1; 10 та 20,5 років. За час функціонування на аноди подавали електричну напругу 5–50 В, струм анодних заземлювачів складав 5–50 А залежно від пори року. Потенціал на захищуваному об’єкті становив від -1 до -1,5 В. Опір ґрунту та анодних заземлювачів у системі анод–ґрунт визначали вимірювачем опору Ф4103-М1.

Вивчали нержавку сталь 12X18H10T труб анодних заземлювачів у різних станах: у вихідному та після 2,5 років експлуатації, що розтшовані на відстані 120 та 150 м від точки дренажу (зразки № 1 та 2, відповідно). За час експлуатації на

аноде подавали електричну напругу 30 В, струм становив 5 А. Потенціал захисту об'єкта – -1,2 В.

Для металографічних досліджень використовували оптичний мікроскоп Neophot 21. Хімічний склад металу анодних заземлювачів та продуктів корозії на їх поверхні, що утворились під час експлуатації, визначали мобільним дуговим/іскровим оптичним емісійним спектрометром SPECTROPORT, застосовуючи атестовані методики вимірювань.

Швидкість корозії сталей визначали гравіметричним та електрохімічним методами.

Електрохімічні властивості сталей анодних заземлювачів вивчали потенціодинамічним методом, використовуючи зразки прямокутної форми 15×10 мм товщиною 3 мм. За корозивне середовище слугував 3%-й водний розчин NaCl. Застосовували триелектродну схему: робочий електрод, хлоридсрібний електрод порівняння і допоміжний – платиновий. Швидкість розгортки потенціалу 1 мВ/с. Поляризаційні криві реєстрували за допомогою програмно-технічного комплексу, який складався з потенціостата ПІ-2МК-10А, перетворювача вимірального забезпечення Е14-440D і програмного забезпечення Powergraph.

Концентрацію водню в сталі визначали вакуумно-екстракційним методом за підвищених температур.

Як корозійно-активні речовини для зниження опору системи анод–грунт використали такі речовини (активатори): № 1 – NH_4NO_3 (аміачна селітра); № 2 – відходи хімічного виробництва (32,4% ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), 19,2% ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), 8,4% NH_4^+ , 17,8% Cl^- , решта – CO_3^{2-}); № 3 – NaCl.

Твердість НВ сталі визначали приладом ТШ-2М, характеристики міцності і пластичності за розтягу циліндричних зразків діаметром робочої частини 5 мм – на розривній машині ИМ-4Р та ударну в'язкість – методами Шарпі та Менаже на маятниковому копрі МК-30а.

У третьому розділі проаналізовано низку аспектів експлуатаційної деградації сталі 20 газопроводу в умовах його катодного захисту.

Металографічним аналізом експлуатованої 51 рік сталі з різних ділянок трубопроводу виявили такі зміни її структури: розкладання перліту, зміну розміру зерна, утворення карбідів у фериті і біля меж зерен. Зокрема, ферито-перлітна сталь у вихідному стані характеризується відношенням площ зерен перліту до фериту 35/65 за шкалою 7 згідно з ГОСТ 8233. Тривала експлуатація спричинила розкладання перліту у всіх досліджених ділянках трубопроводу, однак, найбільше – для ділянки 2, розташованої на відстані 8 км від катодної станції: відношення площ перліт/ферит становило 20/80, що свідчить про суттєві деградаційні процеси у мікроструктурі сталі. На межах феритних зерен та у самих зернах зафіксували дисперсні карбіди.

Методом вакуумної екстракції виявили (табл. 1), що середній вміст залишкового водню в експлуатованому металі значно вищий, ніж у вихідному матеріалі (труба запасу), за винятком металу з ділянки 1 трубопроводу. Зокрема, середня кількість водню у металі ділянки 3 у 5,75, а ділянки 2 – у 13,6 рази вища, ніж для сталі у вихідному стані. Суттєве підвищення кількості водню у сталі

ділянки 2 спричинене, очевидно, її наводнюванням під час експлуатації, оскільки тут реєстрували порушення цілісності ізоляційного покриття. Отже, металу цієї ділянки з найбільшим експлуатаційним розпадом перліту (20/80 проти 35/65 в вихідному стані) властива також найвища концентрація водню, що свідчить про особливу його роль у деградації сталі під час її експлуатації за катодного захисту.

Таблиця 1. Кількість водню у сталі 20 у вихідному стані та після 51 року експлуатації

Стан сталі	Відстань від катодної станції L , км / Ділянка трубопроводу	Кількість водню, ppm	Усереднена кількість водню C_H , ppm
Вихідний	-	0,074...0,201	0,12
Експлуатований	0,5 / ділянка 1	0,046...0,133	0,09
	8 / ділянка 2	0,436...3,225	1,63
	15 / ділянка 3	0,587...0,852	0,69

Електрохімічними вимірюваннями встановили (рис. 1), що потенціал корозії сталі 20 у всіх досліджених станах практично однаковий, що відповідає загальним закономірностям експлуатаційної деградації таких сталей.

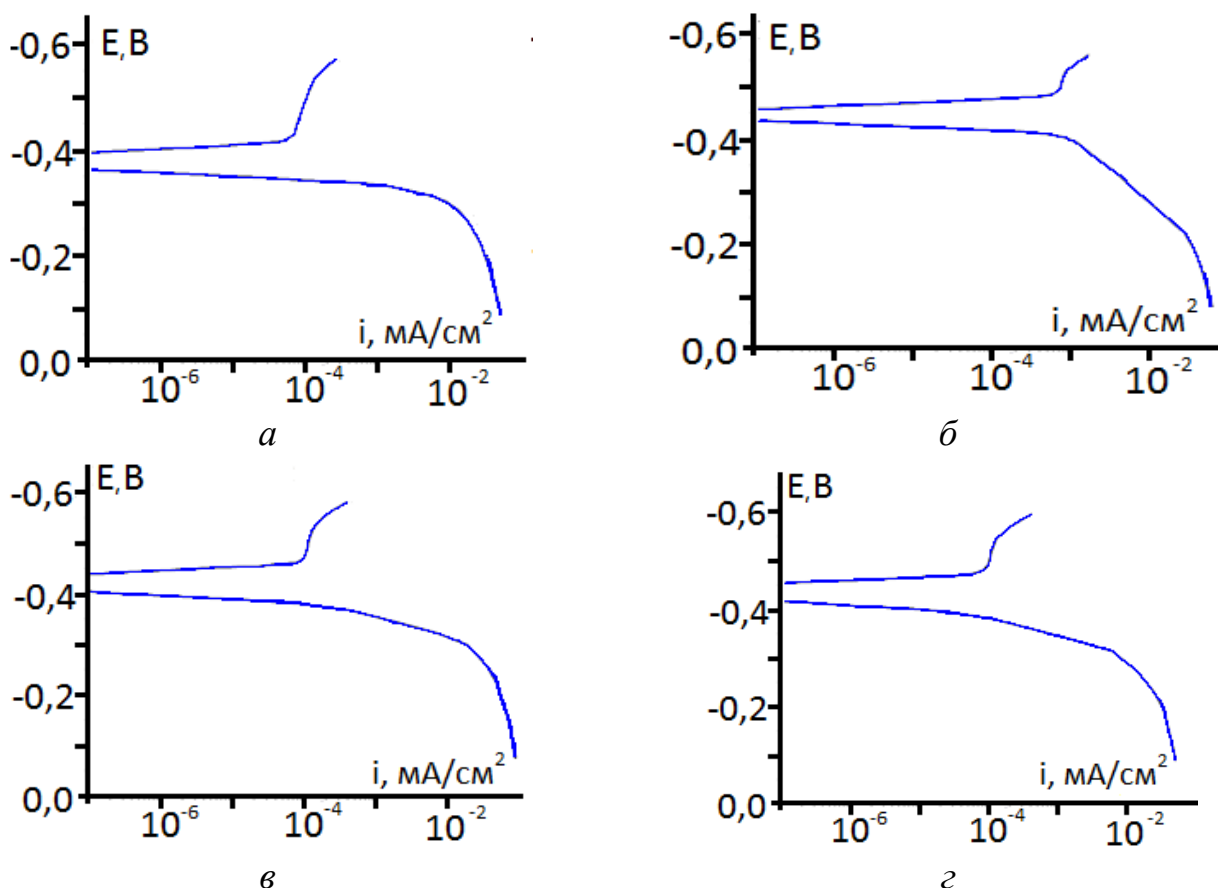


Рис. 1. Поляризаційні криві сталі 20 у 3%-му розчині NaCl:
а – труба запасу; б–г – ділянки 1, 2 та 3, відповідно.

Однак густина струму корозії виявилася достатньо чутливою до змін стану металу внаслідок експлуатації та залежала від відстані досліджуваної ділянки трубопроводу до катодної станції (табл. 2). Зокрема, найменша густина струму корозії $i_{\text{кор}} = 0,56 \cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$ властива металу ділянки 1 (0,5 км від катодної станції), а найбільша ($1,25 \cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$) – сталі ділянки 2, що експлуатувалась на відстані 8 км від катодної станції та для якої фіксували порушення цілісності захисного покриття; густина струму корозії сталі ділянки 3 становила $0,99 \cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$.

Таблиця 2. Електрохімічні характеристики сталі 20 у вихідному стані та після 51 року експлуатації

Стан сталі	Відстань від катодної станції L , км / ділянка трубопроводу	$E_{\text{роб}}$, В	$i_{\text{кор}}$, $\cdot 10^{-4} \text{ А/см}^2$	$E_{\text{кор}}$, В
Вихідний	-	-	0,79	-0,59
Експлуатований	0,5 / ділянка 1	-2,4	0,56	-0,615
	8 / ділянка 2	-0,68	1,25	-0,6
	15 / ділянка 3	-0,6	0,99	-0,6

Корозійна тривкість експлуатованого металу корелює з кількістю абсорбованого ним водню (рис. 2): сталі ділянки 2 з найвищим вмістом водню притаманний найменший опір корозії, який майже в 1,6 рази нижчий, ніж для сталі у вихідному стані. Виявлені відмінності в опорі корозії та кількості водню у металі ділянок 1–3 пов’язали з його деградацією внаслідок сумісної дії експлуатаційних навантажень та захисного потенціалу різними значеннями, що за порушення цілісності ізоляційного покриття спричиняє наводнювання металу. Зниження корозійної тривкості сталі 20 внаслідок експлуатації узгоджується з виявленими експлуатаційними змінами у її мікроструктурі, а саме, збільшенням частки фериту через розпад перліту.

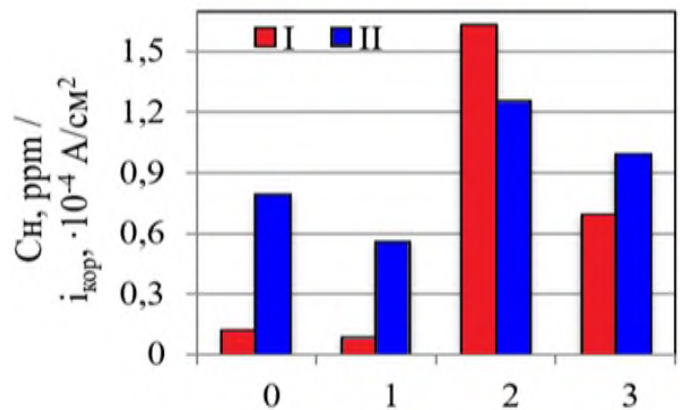


Рис. 2. Усереднена кількість водню C_H (I) та густина струму корозії $i_{\text{кор}}$ (II) сталі 20 у 3%-му розчині NaCl:

0 – труба запасу; 1 – відстань 0,5 км від катодної станції; 2 – 8 км; 3 – 15 км.

Не виявили суттєвих експлуатаційних змін механічних властивостей сталі (табл. 3), водночас її ударна в’язкість (KCU) може знизитися у 1,5 рази. Отже, саме ударна в’язкість – найчутливіший показник деградації сталей.

Таблиця 3. Механічні характеристики сталі 20 у вихідному стані та після 51 року експлуатації

Стан сталі	Відстань від катодної станції L , км / ділянка трубопроводу	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %	КСУ, МДж/м ²	НВ
Вихідний	-	469	30,5	69	23,52	143
Експлуатований	0,5 / ділянка 1	488	22,65	63	21,07	143
	8 / ділянка 2	483	33	59	19,7	143
	15 / ділянка 3	470	31,5	65,5	15,49	137

У четвертому розділі наведено результати досліджень впливу експлуатації на хімічний склад, мікроструктуру, електрохімічну поведінку, корозійну тривкість та механічні властивості сталей анодних заземлювачів, а також на характеристики електричного опору системи анод–грунт.

Проаналізовано мікроструктуру сталі 20 анодних заземлювачів після експлуатації в установках катодного захисту газопроводу упродовж 1; 10 та 20,5 років, виготовлених з експлуатованих 20 років труб. Спостерігали тенденцію до зміни мікроструктури сталі лише для експлуатованого 20,5 років анода: кількість перліту зменшилась з 35 до 30%.

Візуальним обстеженням анодів після тривалої експлуатації виявили загальну та виразкову корозію зовнішньої та внутрішньої поверхонь труб. Ступінь корозійного ураження та глибина корозійних виразок найбільші для металу з найдовшим терміном експлуатації: глибина виразок становила до 1 та 0,7 мм на зовнішній та внутрішній поверхнях труби, відповідно. Це, однак, не критично для подальшої експлуатації анодного заземлювача та вказує на високу корозійну активність тривало експлуатованої сталі 20, що забезпечить стабільну струмовіддачу під час експлуатації заземлювача.

Заміри електричного опору ґрунту $R_{гр}$ у місці встановлення заземлювачів та між ґрунтом і заземлювачами $R_{а.з.}$ з урахуванням тривалості їх експлуатації (табл. 4) свідчать, що показник $R_{гр}$ зберігає стабільно високе значення, а $R_{а.з.}$ зростає від 2 до 21 Ом. Оскільки через збільшення опору $R_{а.з.}$ упродовж експлуатації зменшується густина струму заземлювачів, то для підтримування цього показника катодного захисту ($R_{а.з.}$) необхідно закладати додаткові анодні заземлювачі.

Таблиця 4. Заміри опору ґрунту $R_{гр}$ та між ґрунтом і заземлювачами $R_{а.з.}$

Тривалість експлуатації заземлювача, роки	$R_{гр}$, Ом	$R_{а.з.}$, Ом
0	40	2
1	37	3
10	39	9
20,5	38	21

Поляризаційними дослідженнями у 3%-му розчині NaCl сталі 20 анодного заземлювача після 20,5 років експлуатації та труби запасу не виявили значних

відмінностей у їх електрохімічній поведінці та корозійній тривкості (рис. 3). Проте експлуатованій сталі властива дещо вища інтенсивність анодного розчинення в околі потенціалів $-0,40$ В. Це вказує на перевагу застосування анодів зі заздалегідь експлуатованих труб проти труб запасу через економічну та функціональну доцільність. Аналізуючи роботоздатність сталей трубопроводів транспортування вуглеводнів та анодних заземлювачів установок катодного захисту з урахуванням зміни їх електрохімічних та корозійних властивостей впродовж тривалої експлуатації, слід підкреслити, що, якщо у першому випадку експлуатаційне зниження корозійної тривкості сталі однозначно негативно впливає на роботоздатність трубопроводів, то у другому – позитивно, оскільки внаслідок інтенсифікації анодного розчинення металу заземлювача збільшується струмовіддача та знижується його опір, а також посилюється ефективність катодного захисту.

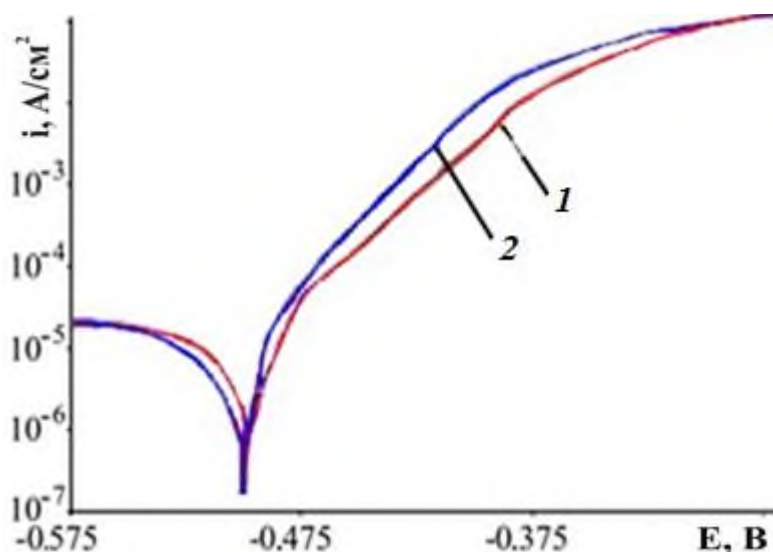


Рис. 3. Поларизаційні криві сталі 20 у 3%-му розчині NaCl:
1 – труба запасу; 2 – труба після 20,5 років експлуатації трубопроводу.

Порівняльний аналіз механічних властивостей сталі 20 анодного заземлювача після різного терміну експлуатації (табл. 5) вказує на деяке підвищення характеристик міцності та пластичності за незначної зміни інших. Це вказує на здатність анодів витримувати навантаження через можливі зсуви ґрунтів навіть після тривалої (20,5 років) експлуатації.

Таблиця 5. Механічні характеристики сталі 20 анодного заземлювача

Тривалість експлуатації заземлювача, роки	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	KCV МДж/м ²	НВ
0	475	269	16	56	1,2	143
1	420	263	28	64	1,27	137
10	485	283	29	66	1,37	133
20,5	526	301	17	57	1,17	149

Досліджували вплив експлуатації (2,5 роки) на характеристики нержавкої сталі 12X18H10T анодних заземлювачів, яку розглядали як альтернативу застосуванню вуглецевих сталей. Електрохімічними дослідженнями сталі анодних

заземлювачів, експлуатованих у ґрунтах з опором 40 Ом, встановили підвищення її корозійної тривкості порівняно зі сталлю у вихідному стані (рис. 4, табл. 6) й експлуатаційний ефект пов'язаний з тим, що нержавка сталь, на відміну від вуглецевих сталей, кородує за умов пасивації. Потенціал корозії $E_{\text{кор}}$ сталі у вихідному стані становить -0,07 В проти -0,09 і -0,12 В для експлуатованої 2,5 років сталі зразків, розташованих на відстані 120 та 150 м від точки дренажу, відповідно (табл. 6). Швидкість корозії сталі у вихідному стані суттєво більша, ніж експлуатованої – у 7,8 рази та 13 разів порівняно з першим та другим зразками, відповідно.

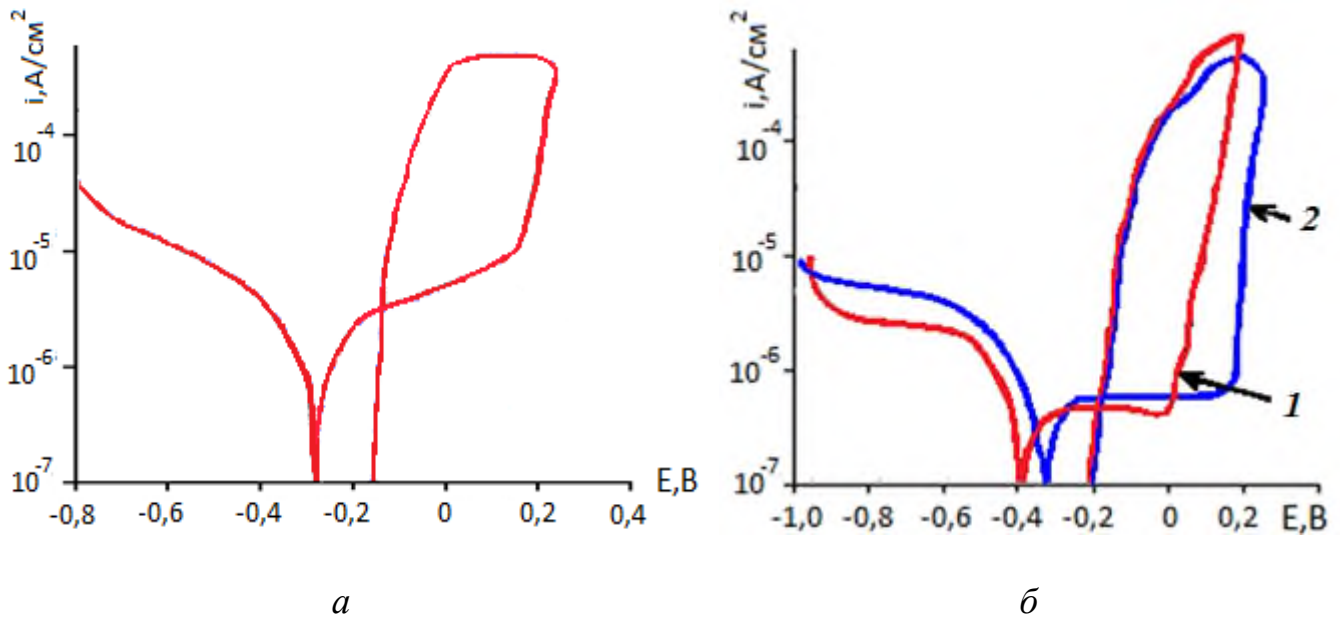


Рис. 4. Поляризаційні криві аустенітної сталі 12X18H10T у 3%-му розчині NaCl: *а* – стан постачання, *б* – анодні заземлювачі № 1 та 2 після 2,5 років експлуатації, що розташовані на відстані 120 та 150 м від точки дренажу, відповідно.

Поляризували від -0,8 – -1,0 В до потенціалу пітингоутворення $E_{\text{пу}}$ та у зворотньому напрямі – до потенціалу репасивації $E_{\text{рп}}$.

Таблиця 6. Електрохімічні показники сталі 12X18H10T у 3%-му розчині NaCl

Стан металу	$E_{\text{кор}}, \text{В}$	$*i_{\text{пп}} \cdot 10^{-6}, \text{А/см}^2$	$E_{\text{пу}}, \text{В}$	$E_{\text{рп}}, \text{В}$	$**\Delta E_{\text{пу}}, \text{В}$	$***\Delta E_{\text{рп}}, \text{В}$
Вихідний зразок	-0,070	7,8	0,180	-0,165	0,250	-0,095
Експлуатований № 1	-0,120	0,6	0,050	-0,160	0,170	-0,040
Експлуатований № 2	-0,090	1,0	0,200	-0,160	0,290	-0,070

Примітка: $*i_{\text{пп}}$ – густина струму повної пасивації за $E_{\text{кор}}$; $**\Delta E_{\text{пу}} = E_{\text{пу}} - E_{\text{кор}}$;
 $***\Delta E_{\text{рп}} = E_{\text{рп}} - E_{\text{кор}}$.

Аналізом показників базисів пітинготривкості сталі 12X18H10T у 3%-му розчині NaCl виявили (табл. 6), що значення $\Delta E_{\text{пу}}$ експлуатованих сталей відрізняються на 0,04 і 0,08 В проти таких для сталі у вихідному стані, а $\Delta E_{\text{рп}}$ більші на 0,025 та 0,055 В для сталей після експлуатації порівняно з вихідним

станом. Таким чином, імовірність зародження пітингів в експлуатованій сталі може бути меншою, а їх репасивація протікатиме швидше. Потенціали корозії як вихідної сталі, так і зразків № 1 та 2 з експлуатованої сталі знаходяться між значеннями $E_{пу}$ і $E_{рп}$. Це вказує на те, що за досягнення навіть короточасних умов для зародження пітингів вони у всіх розглянутих випадках можуть не репасуватися.

Отже, внаслідок експлуатації корозійна тривкість анодів катодного захисту зі сталі 12Х18Н10Т підвищилась, про що свідчить значне зменшення струму розчинення у пасивному стані, а схильність до пітингоутворення знизилась, оскільки, як свідчить співвідношення їх ΔE -критеріїв, пітинги на експлуатованій сталі зароджуватимуться важче, а репасивовуватимуться активніше, ніж на сталі у вихідному стані.

Такий вплив експлуатації заземлювачів на корозійну тривкість нержавкої сталі позитивний, однак викликає сумнів під час аналізу ефективності катодного захисту через корозію анода в умовах пасивації металу. Тому нержавка сталь для анодних заземлювачів характеризуватиметься меншою струмовіддачею, через що необхідна більша кількість труб-анодів, водночас їх висока корозійна тривкість забезпечуватиме великий ресурс роботи.

Аналіз механічних властивостей сталі 12Х18Н10Т анодних заземлювачів після 2,5 років експлуатації виявив незначне підвищення границі міцності (від 620 МПа у вихідному стані до 643...670 МПа в експлуатованому), при цьому характеристики пластичності не знизилися. Це свідчить про те, що аноди не втратили здатність витримувати навантаження через можливі зсуви ґрунтів.

У п'ятому розділі розроблено методи підвищення ефективності роботи анодів введенням у зону анод-ґрунт корозійно-активних речовин, а також нову конструкцію анодного заземлювача.

Під час експлуатації анодних заземлювачів суттєвою проблемою є поступове збільшення електричного опору в системі анод-ґрунт. Тому проаналізували перспективність застосування речовин-активаторів для зниження опору системи та підвищення ефективності роботи анодів під час їх тривалої експлуатації. Активатори закладали біля анодних заземлювачів, виготовлених з труби Ду 159 зі сталі 20 після 20 років експлуатації на трубопроводі високого тиску. Після 23 місяців експлуатації анодів оцінили їх ефективність роботи та характеристики порівняно з анодом без активаторів.

Ферито-перлітна мікроструктура сталі 20 експлуатованих анодних заземлювачів практично не змінилась, однак, на окремих шліфах зафіксували розкладання перліту, в окремих випадках його вміст зменшився на 10% (для сталі 20 анода з активатором NaCl). Мікроструктурні зміни металу супроводжувалися значними корозійними пошкодженнями експлуатованих сталевих заземлювачів.

Досліджували електрохімічні характеристики сталі 20 анодних заземлювачів після експлуатації з активними речовинами (рис. 5а): потенціал корозії для всіх досліджених станів сталі (експлуатованих без та з різними активаторами) відрізняється незначно і знаходиться у межах -0,52...0,53 В, а характер поляризаційних кривих (які реєстрували відразу після занурення електрода в

корозивне середовище, без стабілізації потенціалу) подібний (рис. 5б), корозія відбувається за катодно-анодного контролю.

За оцінками миттєвої швидкості корозії електрохімічним методом (за густиною струму корозії $i_{\text{кор}}$) опір корозії сталі анодів, що експлуатувались з активаторами № 2 та № 3 і без активатора є практично однаковим (табл. 7), тоді як анода, що експлуатувався з активатором № 1 – нижчий на ~ 30%, що свідчить про її вищу корозійну активність, яка також проявляється у вищій інтенсивності протікання катодної реакції кисневої деполяризації (рис. 5б).

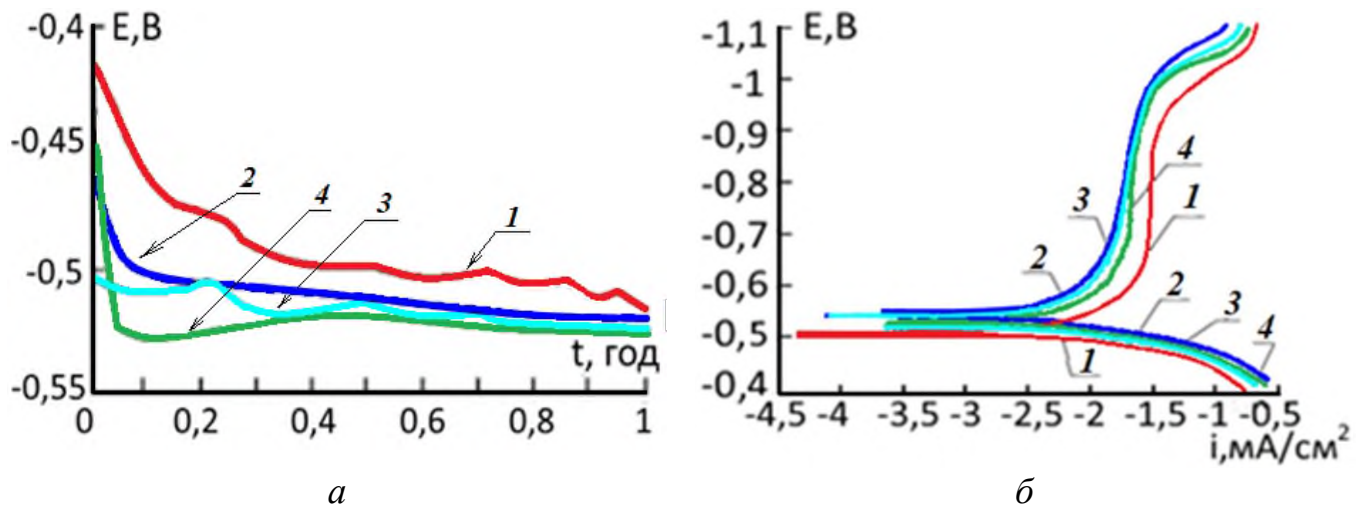


Рис. 5. Зміна з часом потенціалу корозії (а) та поляризаційні криві (б) сталі 20 анодних заземлювачів у 3%-му розчині NaCl з активаторами № 1–3 (1–3) та без них (4).

Таблиця 7. Електрохімічні характеристики та швидкість корозії (експозиція 228 год) сталі 20 анодних заземлювачів у 3%-му розчині NaCl

№ зразка	Умови експлуатації	$E_{\text{кор}}, \text{В}$	$i_{\text{кор}}, \cdot 10^{-6} \text{А/см}^2$	Ваговий показник швидкості корозії K , г/(м ² ·год)	Глибинний показник швидкості корозії P , мм/рік	Струмовий показник швидкості корозії i , $\cdot 10^{-6} \text{мА/см}^2$
1	Анод + активатор № 1	-0,522	8,6	0,093	0,10	8,9
2	Анод + активатор № 2	-0,527	6,1	0,100	0,11	9,6
3	Анод + активатор № 3	-0,530	6,6	0,113	0,13	10,8
4	Анод без активатора	-0,525	6,6	0,102	0,11	9,8

Швидкість корозії сталі анодних заземлювачів, які експлуатувалися з активними речовинами, за ваговим показником відрізняється теж незначно (~17%). Під час перерахунку вагового показника швидкості корозії у струмовий отримали дещо вищі значення, ніж коли використовували електрохімічний показник густини струму корозії. Одержані різними методами значення густини струму відрізняються найменше для сталі анода, що експлуатувався з активатором № 1 (рис. 6): i миттєва, i усереднена за час експозиції швидкість корозії практично однакова. Це свідчить про те, що продуктам корозії, що утворюються на поверхні зразків, не властиві захисні властивості, які би сповільнювали процес. Анод, що експлуатувався з активатором № 3, характеризується найвищою серед досліджених корозійною активністю після експозиції 228 год у 3%-му розчині NaCl (табл. 7): глибинний показник швидкості корозії сталі анода з активатором № 3 на ~ 18% вищий, ніж без активатора та з активатором № 2, та на ~30% вищий, ніж для сталі анода з активатором № 1, що свідчить про доцільність його застосування для забезпечення тривалої ефективної роботи, оскільки його струмовіддача найвища.

Аналіз результатів механічних випробувань сталей анодних заземлювачів засвідчив (табл. 8), що активні речовини загалом впливають на механічні властивості металу: дещо погіршуються характеристики міцності та пластичності. Це означає, що експлуатаційна деградація механічних властивостей корелює зі змінами корозійних показників та електрохімічних функціональних властивостей системи катодного захисту трубопроводів. Однак це несуттєво впливає на конструкційну міцність анодних заземлювачів, ураховуючи можливі їх експлуатаційні механічні навантаження.

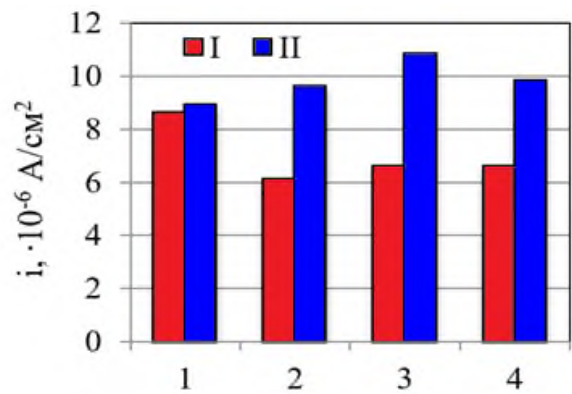


Рис. 6. Густина струму корозії (I) та струмовий показник швидкості корозії (II) сталі 20 анодних заземлювачів у 3%-му розчині NaCl: з активаторами № 1–3 (1–3) та без них (4).

Таблиця 8. Вплив активних речовин на механічні характеристики металу заземлювачів

№ зразка	Назва	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	KCU, МДж/м ²	НВ
1	Анод + активатор № 1	522	22,0	67,3	1,16	156
2	Анод + активатор № 2	480	25	70,0	2,35	143
3	Анод + активатор № 3	500	22	68,0	2,48	143
4	Анод без активатора	482	33	59	1,97	137
	Сталь 20 згідно з ГОСТ 550-75	≥ 431	≥ 21,0	≥ 50	≥ 0,76	≤ 156

Дослідження електричного опору ґрунту і системи анод–ґрунт підтвердили ефективність активаторів (табл. 9). Моніторингом показників електричного опору ґрунту та анодних заземлювачів впродовж 23 місяців використання активних речовин встановили зменшення опору в системі анод–ґрунт (табл. 9), що дало змогу знизити струмове навантаження внаслідок зменшення опору анодних заземлювачів. Оскільки вимірюване значення опору ґрунту залежало від пори року, кількості опадів та рівня ґрунтових вод, то ці показники враховували під час визначення опору в системі анод–ґрунт на момент відповідного заміру.

Найефективніше на зміну опору анодних заземлювачів $R_{a.z.}$ вплинув активатор № 3 (табл. 9): опір анодного заземлювача упродовж періоду спостережень знижувався або залишався приблизно на тому ж рівні. Інші активатори теж виявилися ефективними, але менше.

Таблиця 9. Показники електричного опору ґрунту $R_{гр}$ і системи анод-ґрунт $R_{a.z.}$ впродовж 23 місяців використання активних речовин

№ з/п	На момент закладання		Через 7 місяців		Через 9 місяців		Через 10 місяців*		Через 10 місяців і 2 тижні після заливання водою		Через 23 місяці*	
	$R_{гр}, \text{Ом}$	$R_{a.z.}, \text{Ом}$	$R_{гр}, \text{Ом}$	$R_{a.z.}, \text{Ом}$	$R_{гр}, \text{Ом}$	$R_{a.z.}, \text{Ом}$	$R_{гр}, \text{Ом}$	$R_{a.z.}, \text{Ом}$	$R_{гр}, \text{Ом}$	$R_{a.z.}, \text{Ом}$	$R_{гр}, \text{Ом}$	$R_{a.z.}, \text{Ом}$
1	41	40	50	22,5	48	21	50/42	20/2,5	23	5	52/16	9/5
1'	32	20	42,2	11,8	35	12	42,2/29	12/6	22	2	42/17	10/7
2	30	8,8	30	4,5	36	16	30/20	16/6	24	2	47/22	6/4
2'	28	7	40	7	51	6	40/25	8/5	22	12	45/19	11/9
3	40	9	48	12	43	11	48/38	11/4,5	23	4	49/20	7/3
3'	28	22	31,5	14	35	13	31,5/22	13/6,4	24	8	40/19	5/4

Позначення:

1, 1' – NH_4NO_3 ; 2, 2' – суміш 32,4% ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), 19,2% ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), 8,4% NH_4^+ , 17,8% Cl^- , решта – CO_3^{2-} ; 3, 3' – NaCl ; наведені дані по двох анодних заземлювачах з кожним активатором;

* – у чисельнику та знаменнику – дані до та після заливання технічною водою у той же день, відповідно.

Для порівняння отриманих показників використали значення опору зразків, які експлуатувались в однакових умовах, але без активаторів, та опору ґрунту поблизу них. Зокрема, значення $R_{гр}$ становили 39; 44 та 46 Ом, а $R_{a.z.}$ – дорівнювали 8,5; 8 та 8 Ом для зразків, що експлуатувались поблизу анодів з активаторами № 1, 2 та 3, відповідно. Виявили, що опір сталі 20 анодів, що експлуатувались з активаторами, нижчий на ~ 30; 20 та 56%, а опір ґрунту – на ~ 58; 53 та 58% під час застосування активаторів № 1, 2 та 3, відповідно, порівняно зі зразками, що експлуатувались без них.

Розроблено нову конструкцію анодного заземлювача (рис. 7), яка враховує виявлені електрохімічні особливості процесів у системі анод–кокса засипка–

грунт, щоб зменшити в ній електричний опір. Виготовили глибинний анодний заземлювач відповідної форми та з підготовленими технологічними отворами. Глибина заземлювача 20 м, діаметр 273 мм, діаметр технологічних отворів 10...15 мм, кількість технологічних отворів на 20 метрах глибинного анодного заземлювача 240 шт., нижня частина глибинного анодного заземлювача виготовлена у вигляді гострого конусу з відповідними технологічними прорізами (рис. 7). При цьому під час підняття ґрунтових вод на глибину 8...10 м рідина проникатиме в технологічні отвори анодного заземлювача і внаслідок цього суттєво зменшуватиметься його опір та, відповідно, поліпшуватимуться умови роботи катодної станції, що зумовить зниження витраченої електроенергії. Встановили, що розроблена конструкція анодного заземлювача дає можливість за збільшення електричного опору аноду заливати технічну воду або розчин активних речовин всередину труби, а вирізані отвори уможливають просочення рідини на зовнішню поверхню труби, що зменшує електричний опір у системі анод–ґрунт на 35–50%.



Рис. 7. Конструкція глибинного анодного заземлювача Ду 273 мм.

Практика засвідчила, що закладання активних речовин біля анодних заземлювачів простий технічно та вигідний економічно метод, а виконані дослідження доводять можливість використання активних речовин для подовження терміну експлуатації вже діючих анодних заземлювачів.

У додатках наведено акт використання результатів досліджень, а також перелік публікацій.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено актуальне науково-технічне завдання – встановлення закономірностей деградації трубних сталей в умовах катодного захисту та її впливу на роботоздатність анодних заземлювачів упродовж тривалої експлуатації, а також розроблення методів підвищення ефективності їх роботи та подовження ресурсу. Найважливіші наукові та практичні результати полягають ось у чому:

1. Вперше виявлено суттєві зміни у структурі вуглецевої ферито-перлітної сталі 20 внаслідок тривалої експлуатації в умовах катодного захисту трубопроводу під тиском: збільшення частки фериту через розпад перліту. Вони супроводжувались підвищенням концентрації залишкового водню, істотним

погіршенням корозійної тривкості та деяких механічних властивостей, однак, несуттєвих щодо втрати трубними заземлювачами своєї конструкційної міцності.

2. Порівняльними поляризаційними вимірюваннями у 3%-му розчині NaCl сталі 20 експлуатованого 51 рік трубопроводу встановлено, що потенціал корозії нечутливий до експлуатаційної зміни стану металу, однак, суттєво знижується опір корозії металу (в 1,6 рази), що супроводжується підвищенням концентрації водню (більш, ніж на порядок) та збільшенням частки фериту через розпад перліту, що свідчить про особливу роль водню у процесах деградації ферито-перлітної сталі за її катодного захисту.

3. Для анодів, виготовлених зі сталі аустенітного класу 12X18H10T як альтернативної вуглецевим сталям, встановлено зниження схильності до пітингоутворення та підвищення корозійної тривкості у 7,8–13 разів після 2,5 років експлуатації порівняно зі сталлю у вихідному стані. Така сталь характеризуватиметься меншою струмовіддачею, через що потрібна більша кількість труб-анодів, а їх високий опір пітингоутворенню забезпечуватиме великий ресурс роботи.

4. Виявлено значне (від 2 до 21 Ом) зростання електричного опору в системі анод-стал-грунт після ~20 років експлуатації заземлювача, що знижує ефективність катодного захисту трубопроводу.

5. Розроблено новий метод підвищення ефективності роботи анодних заземлювачів зі сталевих труб активаторами, що дало можливість знизити та стабілізувати опір системи анод-грунт. Електричний опір сталі 20 анода за використання упродовж 23 місяців активаторів NaCl, NH_4NO_3 та суміші 32,4% ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), 19,2% ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), 8,4% NH_4^+ , 17,8% Cl^- , решта – CO_3^{2-} та заливання технічною водою був нижчим на ~ 56; 30 і 20%, а опір ґрунту – на ~ 58; 58 і 53%, відповідно, порівняно зі зразками, що експлуатувались без активаторів. Активатори практично не впливають на потенціал корозії сталі 20, а її корозійна активність після експлуатації анода з активатором NaCl є вища на ~ 20% проти анода без нього.

6. Створено нову конструкцію глибинного анодного заземлювача на основі труби, яка дає можливість ефективно зменшувати електричний опір в системі анод-грунт введенням технічної води або розчину всередину труби з можливістю просочування 5000 літрів рідини на зовнішню поверхню заземлювача.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Arkhypov O. H., Koval'ov D. O., Usov D. I., Lyubymova-Zinchenko O. V., Venhrynyuk T. P. In-service degradation of the pipe steel of grounding anodes. *Materials Science*. 2016. Vol. 52. P. 240–245. (Scopus, Web of Science)
2. Архипов О. Г., Усов Д. І., Любімова-Зінченко О. В. Експлуатаційна деградація металу газопроводів і підвищення ефективності роботи анодів катодного захисту. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018. Спец. вип. № 12. С. 253–257.

3. Архипов О. Г., Усов Д. І., Карпюк Л. В., Галабурда Н. І. Деградація металу газопроводів в умовах катодного захисту. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 9 (239). С. 13–16.
4. Архипов О. Г., Усов Д. І., Карпюк Л. В., Галабурда Н. І. Підвищення ефективності роботи анодних заземлювачів шляхом подолання електрохімічних бар'єрів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 5 (235). С. 30–33.
5. Архипов О. Г., Усов Д. І., Любімова-Зінченко О. В. Деградація анодних заземлень під час тривалої експлуатації. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 2. С. 19–24.
6. Архипов О. Г., Ковальов Д. О., Усов Д. І., Любімова-Зінченко О. В. Структурні зміни металу анодних заземлювачів внаслідок експлуатаційної деградації. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2016. № 4 (228). С. 38–42.
7. Архипов О. Г., Усов Д. І., Любімова-Зінченко О. В. Дослідження електрохімічних характеристик та опору ґрунту анодних заземлень під час тривалої експлуатації. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2019. № 8 (256). С. 111–117.
8. Архипов О. Г., Усов Д. І., Любімова-Зінченко О. В. Практика використання анодів з корозивнотривких сталей за катодного захисту газопроводів. *Стародубівські читання*. 2018. С. 27–30.
9. Патент України № 125746. Анодний вузол станції катодного захисту / О. Г. Архипов, В. М. Москалик, Д. І. Усов. Опубл. 25.05.2018; Бюл. № 10.
10. Патент України № 129932. Анодний вузол станції катодного захисту від корозії підземних металевих споруд / О. Г. Архипов, В. М. Москалик, Д. І. Усов. Опубл. 26.11.2018; Бюл. № 22.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Усов Д. І. Графіто-стальне анодне заземлення. «*Технологія–2016*»: матеріали XIX міжнародної науково-технічної конференції (Сєверодонецьк, 22–23 квітня 2016 р.). Сєверодонецьк, 2016. Ч. 1. С. 214–216.
12. Усов Д. І. Сосредоточенные графито-ферросилидные анодные заземлители. *Перспективи розвитку нафтогазової галузі: матеріали III міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених* (Кореїз, 13–16 грудня 2010 р.). Київ, 2011. С. 122–124.
13. Архипов О. Г., Усов Д. І., Любімова-Зінченко О. В. Деградація металу магістральних трубопроводів за тривалої експлуатації. «*Технологія–2017*»: матеріали XX міжнародної науково-технічної конференції (Сєверодонецьк, 21–22 квітня 2017 р.). Сєверодонецьк, 2017. С. 194–196.
14. Усов Д. І., Архипов О. Г., Усов Н. І. Підвищення ефективності роботи анодних заземлювачів шляхом подолання електрохімічних бар'єрів. «*КМН–2017*»: матеріали XXV відкритої міжнародної науково-технічної конференції молодих

науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України (Львів, 27–29 вересня 2017 р.). Львів, 2017. С. 88–92.

АНОТАЦІЯ

Усов Д. І. Підвищення ефективності тривало експлуатованих анодних заземлювачів установок катодного захисту трубопроводів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії. – Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, 2021.

Дисертацію присвячено встановленню електрохімічних особливостей та закономірностей експлуатаційної деградації сталей трубопроводів ферито-перлітного та аустенітного класів за катодного захисту, її впливу на стан анодних заземлювачів, а також розробленню методів підвищення ефективності їх роботи та подовження ресурсу.

Виявлено експлуатаційний розпад перліту у сталі 20 за катодного захисту трубопроводу, який супроводжувався зниженням корозійної тривкості та підвищенням концентрації водню. Встановлено перевагу у використанні для заземлювачів експлуатаційно деградованих труб. Зафіксовано експлуатаційне зниження схильності до пітингоутворення та підвищення корозійної тривкості сталі 12X18H10T, через що необхідна додаткова кількість анодів, проте збільшується їх ресурс.

Запропоновано метод підвищення ефективності анодних заземлювачів активаторами. Розроблено конструкцію анодного заземлювача, яка дає можливість контролювати опір у системі анод–грунт використанням технічних розчинів.

Ключові слова: сталь, активні речовини, анодний заземлювач, електричний опір, катодний захист, корозія.

АННОТАЦИЯ

Усов Д. И. Повышение эффективности длительно эксплуатируемых анодных заземлений установок катодной защиты трубопроводов. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.14 – химическое сопротивление материалов и защита от коррозии. – Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Львов, 2021.

Диссертация посвящена установлению электрохимических особенностей и закономерностей эксплуатационной деградации сталей трубопроводов феррито-перлитного и аустенитного классов при катодной защите, ее влияния на состояние анодных заземлителей, а также разработке методов повышения эффективности их работы и продолжения ресурса.

Выявлен эксплуатационный распад перлита в стали 20 при катодной защите трубопровода, который сопровождался снижением коррозионной стойкости и повышением концентрации водорода. Установлено преимущества использования для заземлителей эксплуатационно деградированных труб. Зафиксировано эксплуатационное снижение склонности к питтингообразованию и повышение коррозионной стойкости стали 12X18H10T, что требует дополнительного количества анодов, однако увеличивает их ресурс.

Предложен метод повышения эффективности анодных заземлений активаторами. Разработана конструкция заземления, которая позволяет контролировать сопротивление в системе анод–грунт использованием технических растворов.

Ключевые слова: сталь, активные вещества, анодное заземление, электрическое сопротивление, катодная защита, коррозия.

ABSTRACT

Usov D. I. Improving the efficiency of long-term operated anodic groundings of cathodic protection system of pipelines. – Qualification scientific work as the manuscript.

Thesis for the Candidate's degree in engineering sciences by speciality 05.17.14 – Chemical resistance of materials and corrosion protection. – Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, 2021.

The dissertation is devoted to the establishment of electrochemical features and regularities of degradation of ferrite-pearlite and austenitic steels of pipelines under cathodic protection, its impact on the state of anode groundings over a long service life, as well as the development of the methods to improve their efficiency and extend the resource.

Significant changes in the microstructure of the low carbon ferrite-pearlite 20 steel as a result of its long-term operation under cathodic protection of pipeline under high pressure were revealed: an increase in the portion of ferrite because of the decomposition of pearlite. They were accompanied by an increase in the concentration of residual hydrogen, a significant decrease in the corrosion resistance and some mechanical properties but not enough noticed from the point of a loss structural strength of pipe groundings. It has been established that the 20 steel operated for 51 years having the highest hydrogen content (more than in order in comparison with the initial steel state) is characterized by the lowest corrosion resistance in 3% NaCl (1.6 times lower than that of steel in the initial state) and the highest portion of ferrite due to the operational decomposition of pearlite, which indicates a special role of hydrogen in degradation process. The advantage in the usage of degraded pipes after preliminary operation for anodic groundings has been shown, which are characterized by increased current output due to the operational decrease of their corrosion resistance.

For anodes manufactured from the austenitic 12X18H10T steel as alternative for carbon steels a decrease in pitting and an increase in corrosion resistance by 7.8-13 times, depending on the distance from the drainage point after 2.5 years of operation, compared with steel in the initial state, have been revealed. Such an effect of groundings operation

on corrosion resistance of stainless steel is positive, but it can cause problem in the analysis of the effectiveness of cathodic protection. Therefore, their use will require a larger number of anode tubes as a result of a decrease in current output, but will provide a long service life due its high resistance to pitting.

During the operation of anode groundings, a significant problem is the gradual increase in electrical resistance in the anode-soil system. A significant, from 2 to 21 Ohm, increase in electrical resistance in the anode steel 20-soil system after ~ 20 years of grounding operation is shown, which reduces the effectiveness of the cathodic protection of the pipeline.

A new method has been developed to improve the efficiency of anode grounding from steel pipes using activators, which made it possible to reduce and stabilize the resistance of the anode-soil system. Using activators such as NaCl, NH_4NO_3 and mixture of the content: 32,4% ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), 19,2% ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), 8,4% NH_4^+ , 17,8% Cl^- , a rest – CO_3^{2-} , when applied over 23 months, the electrical resistance of the 20 steel anode decreased by 56, 30 and 20%, and soil resistance – by 58, 58 i 53%, correspondingly compared to the anode without an activator. Activators have no effect on the corrosion potential of the 20 steel, and its corrosion resistance after operation as an anode with a NaCl activator is lower by ~ 20% compared to an anode without an activator.

A new design of anode grounding on the basis of a steel pipe has been developed, which provides the ability to controllably reduce the resistance in the anode-soil system by periodic pounding of 5000 liters of technical solution or water. The developed design of the anode grounding provides the possibility to fill in the liquid inside the pipe at increasing the electrical resistance of the anode, and the cut holes allow the liquid to seep to the outer surface of the pipe and reduce the electrical resistance in the anode-soil system by 35-50%. It has been shown by practice that placing active substances near the anode groundings is technically simple and economically viable method, which enable to extend the service life of operated anode groundings.

Key words: steel, active substances, anode grounding, electrical resistance, cathodic protection, corrosion.

Підписано до друку 29.03.2021р.
Формат 60х84/16. Гарнітура Times.
Ум. Друк. Арк. 0,9. Друк цифровий.
Зам. №1241. Наклад 100 прим.

Друк ПП «Поліграф-Сервіс»
93400, пр..Гвардійський, 30, м.Сєвєродонецьк
Тел.(0645) 70-14-41