

ВІДГУК

офіційного опонента Банахевича Ю. В. на дисертаційну роботу Ниркової Людмили Іванівни «Теоретико-експериментальні засади оцінювання та запобігання корозійному розтріскуванню сталей магістральних газопроводів в умовах їх катодного захисту», представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії.

1. Актуальність теми дисертації.

Газотранспортна система України є на сьогодні однією з найбільших за розміром та найстаріших за терміном експлуатації в світі. Тому забезпечення її надійної та безперебійної експлуатації є дуже важливим та актуальним завданням. Під час експлуатації магістральних газопроводів і газопроводів-відгалужень практично неможливо запобігти уникненню різного типу уражень, що призводять до розгерметизації тіла труби, а, зокрема, корозійного розтріскування, яке досить важко прогнозується та є надзвичайно небезпечним явищем. Частка аварій на магістральних газопроводах, спричинених саме цим видом руйнування, досягає значних величин і становить велику небезпеку як з економічної, так і з інших точок зору. Враховуючи цю небезпеку та масштабність явища корозійного розтріскування, пошук нових підходів щодо його запобігання є актуальною науковою та прикладною проблемою.

2. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується:

- чітким формулюванням проблеми, шляхів її вирішення та комплексним підходом при її розв'язанні;
- використанням для досягнення мети сучасних методів досліджень згідно вимог відповідних нормативних документів та проведенням на їх основі великого обсягу досліджень, несуперечливість отриманих в роботі результатів та їх опосередкована узгодженість з відомими висновками інших дослідників;
- використанням для досягнення мети сучасних методів фізичного, математичного і комп'ютерного моделювання корозійного стану трубопроводів великих діаметрів;
- обґрунтуванням необхідності врахування чинників, що присутні на магістральному газопроводі при його експлуатації (контакт з корозивним середовищем, прикладений захисний потенціал, накопичені цикли змін напруження, що моделюють тривалу експлуатацію газопроводу, наявність концентратора напружені, захисних покривів тощо), проведенні досліджень та оцінюванні схильності трубної сталі до корозійного розтріскування;
- розробленням критеріїв оцінювання умов, за яких потенційно можливе виникнення процесів, які спричиняють деградацію захисних полімерних покривів (зокрема стрічкового) при катодному захисті, а саме: наявність дефекту в покриві, його контакт з корозивним середовищем та катодна поляризація;

- використанням методів фізичного, математичного і комп'ютерного моделювання, що дає змогу запропонувати новий спосіб для практичного оцінювання схильності трубної сталі різної міцності до корозійного розтріскування, заснований на аналізі довжини спадних ділянок кривих руйнування та ввести відповідний коефіцієнт Кт;
- успішною апробацією розроблених методичних рекомендацій та нормативних документів в ДК «УКРТРАНСГАЗ» для проведення технічного діагностування магістральних газопроводів і газопроводів-відгалужень та оцінки руйнування газопровідних систем.

3. Оцінка змісту роботи.

Робота містить пов'язані між собою теоретичні і експериментальні дослідження, які у сукупності вирішують задачу підвищення рівня безпеки при транспортуванні природного газу шляхом розроблення ефективних методів оцінки негативного впливу корозійного розтріскування трубних сталей газотранспортної інфраструктури.

На підставі представлених здобувачем дисертації, автореферату дисертації, 50 опублікованих праць здобувача за темою дисертації складено цей відгук.

Дисертаційна робота складається з вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 363 сторінки (з них 272 сторінки основного тексту) з 72 рисунками, 46 таблицями бібліографічним списком із 373 найменувань та 3 додатків. Автореферат складається з 41 сторінки.

У вступі наведено актуальність теми дисертаційної роботи, указано на її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, наведено мету та завдання дослідження, проблему, яка вирішується, охарактеризовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, вказано про особистий внесок дисертанта в наукових працях.

У першому розділі розглянуто сучасний стан діючих магістральних газопроводів України та проаналізовано причини їх руйнування в умовах експлуатації. На основі довідкових джерел дано визначення явища корозійного розтріскування, представлено огляд чинників, що його спричиняють, зроблено їх аналіз, наведено характеристику основних типів корозійного розтріскування залежно від корозійності середовища та дано характеристику можливих механізмів розвитку процесу, всебічно розглянуто умови, що викликають деградацію полімерних покривів, які застосовуються на магістральних газопроводах, визначено вплив процесу деградації на корозію газопроводів під відшарованим покривом, представлено сучасні уявлення про механізми деградації полімерних покривів при катодному захисті та розглянуто заходи щодо продовження строку їх служби, дана характеристика критеріїв електрохімічного захисту, які застосовуються для оцінювання його ефективності та аналіз вимог нормативних документів в сфері захисту від корозії магістральних трубопроводів, наведено підходи до оцінювання небезпеки корозійного розтріскування магістральних газопроводів. Сформульовано основні завдання дисертаційної роботи та напрями їх вирішення.

У другому розділі обґрутовано вибір об'єктів досліджень, наведено методики досліджень. У роботі використані сучасні низьколеговані сталі контролюваної прокатки трубного сортаменту X70 та X80. Форму та розмір зразків вибирали згідно з чинними нормативними документами залежно від мети випробувань. Сталеві зразки виготовляли: з експлуатованих труб зі сталі X70, які відрізнялися за технологією виробництва (їх умовно

позначали: труба А – двошовна труба розміром 1420x15,7 мм, яка виготовлена методом валкового формування, труба Б – одно шовна труба розміром 1420x15,7 мм, яка виготовлена на пресах); з темплетів труб, які не були в експлуатації (виготовлених за такою самою технологією, як труба А) зі сталі X70 та X80. Хімічний склад та механічні властивості досліджуваних зразків відповідали технічним умовам на відповідні труби.

Швидкість проникнення корозії за умови рівномірної корозії (у $\text{мм}/\text{рік}$) визначали методом масометрії. Миттєву швидкість корозії визначали методом поляризаційного опору на датчиках з коповерхневим розташуванням електродів зі сталі X70 або X80 за допомогою корозиметра універсального УИСК-101 із самописцем КСП.

Потенціали задавали та вимірювали за допомогою потенціостата ПИ-50-1.1 та програматора ПР-8 відносно хлорид-срібного електроду порівняння. Поляризаційні криві вимірювали у потенціодинамічному режимі за триелектродною схемою за допомогою потенціостата ПИ-50-1.1 та програматора ПР8. Швидкість сканування потенціалу $5 \times 10^{-4} \text{ В/с}$. З поляризаційних кривих визначали електрохімічні характеристики. Випробування при постійній деформації проводили у модельному ґрутовому електроліті при прикладеному захисному потенціалі -1,0 В. Застосовували зразки у вигляді брусу розміром $100 \times 10 \times 3$ мм, які навантажували згинанням за чотири точковою схемою згідно з ГОСТ 9.901-2. Постійне навантаження обирали за умови забезпечення максимального напруження на рівні 0,95 від границі текучості. Тривалість випробувань становила 1 рік. Дослідження при малій швидкості деформації проводили на розривній машині АІМА-5-1 зі швидкістю розтягування зразків 10^{-6} с^{-1} у повітрі та у випробувальних розчинах. Випробовували зразки з площею поперечного перерізу в робочій частині 9 та 30 mm^2 . Дослідження виконували при потенціалі корозії та прикладених катодних потенціалах в діапазоні від -0,75 В до -2,0 В. Для моделювання впливу дії циклічних розтягуючих напружень, яку зазнає газопровід під час тривалої експлуатації, частину зразків заздалегідь піддавали попередньому циклічному навантаженню з частотою 10 Гц протягом 10^5 циклів. На частині зразків моделювали локальний концентратор напружень (КН) V-подібної форми. Випробування проводили при повному зануренні у розчин та в умовах періодичного змочування.

Дослідження захисних властивостей полімерних покривів проводили методом контролю катодного відшарування згідно з ДСТУ 4219 у 3 %-му NaCl та модельному ґрутовому електроліті за температури 20°C та за циклічної зміни температур: від 20°C до 50°C , від 20°C до 70°C впродовж різного часу – від 1 до 4 місяців. Максимальну температуру та тривалість випробувань корегували в залежності від властивостей покривів.

У *третьому розділі* наведено результати комплексного вивчення та аналізу впливу металургійних, експлуатаційних та механічних чинників на закономірності процесу корозійного розтріскування сталі трубного сортаменту (на прикладі сталі X70). Для оцінювання схильності сталі до корозійного розтріскування введено коефіцієнт K_S , в якому враховано зміну пластичних властивостей металу у корозивному середовищі порівняно з його властивостями в повітрі.

Згідно з ДСТУ 4219 нормоване значення захисного поляризаційного потенціалу знаходиться в діапазоні від -0,85 В до -1,15 В (відносно мідно сульфатного електроду порівняння), що відповідає від -0,75 В до -1,05 В (відносно хлорид-срібного електроду порівняння). Корозійно-механічні властивості сталі X70 дослідили за потенціалу, наблизленого до максимального захисного, -1,0 В (відносно хлорид-срібного електроду порівняння) за різних комбінацій чинників корозійного розтріскування. Значення коефіцієнта K_S становили $\sim 1,7$ (зразок 2) і $\sim 2,15$ (зразок 6 і 7), $\sim 2,07$ (зразок 8), $\sim 1,75$ (зразок 10) та $\sim 1,7$ (зразок 9). Тобто, теоретично чисельні значення коефіцієнта K_S можуть змінюватися від 1 до нескінченності. Для його практичного застосування важливо встановити граничне значення, вище за яке слід вважати сталь схильною до розтріскування. Для цього проаналізували результати корозійно-механічних досліджень

сталі X70 за впливу різних чинників корозійного розтріскування, види зламів та відповідні значення коефіцієнтів K_S .

За зовнішнім виглядом зруйнованих за різних умов зразків можна виділити принаймні дві серії, характер зламів яких принципово відрізняється. Зразки першої серії (з номерами від 2 до 7) під час випробувань зазнавали пластичного деформування, внаслідок чого відбулося характерне утягування в околі руйнування, при цьому злам мав в'язкий характер, а значення коефіцієнта K_S змінювалися від ~1,04 до ~1,56. Злами зразків 8 – 15 характер, а значення коефіцієнта K_S змінювалися від ~1,04 до ~1,56. Злами зразків 8 – 15 візуально можна відмітити меншу частку пластичного відрізняються від вищепередбачених: візуально можна відмітити меншу частку пластичного деформування, і, як наслідок – збільшення коефіцієнта K_S до ~1,6-3,5. Під час проведення робіт з встановлення причин руйнування магістрального газопроводу діаметром 1420 мм і товщиною стінки 15,7 мм на прилеглій до корозійної тріщини ділянці руйнування залишкова товщина стінки труби становила близько ~(35-40) % від номінальної, і характер зламу за багатьма ознаками був схожий на той, що спостерігали у лабораторних умовах. Це відповідає значенню коефіцієнта $K_S = 1,6$. Аналізуючи вищепередбачені експериментальні дані, запропонували вважати сталь схильною до корозійного розтріскування, якщо значення коефіцієнта K_S дорівнює або більше 1,60.

Четвертий розділ присвячений дослідженню процесу деградації системи тришарового стрічкового покриву та його впливу на корозію сталі X70, зокрема, на схильність до корозійного розтріскування у модельному ґрутовому електроліті. Експериментально підтверджено, що при контакті з модельним ґрутовим електролітом відбувається деградація ґрунтувального та клейового шарів стрічкового покриву, яка проявляється у порушенні суцільності ґрунтувального шару та збільшенні покривом волого поглинання через 2,5 місяці. Процес деградації покриву супроводжується зміною властивостей модельного ґрутового електроліту, з яким він контактував (рН та електропровідності), що, ймовірно, обумовлено переходом в розчин компонентів ґрунтувального шару. Отже, через 1 місяць рН та електропровідність зросли, при збільшенні тривалості випробувань до 2,5 місяців – зменшилися. Відзначено також і зміну корозійності середовища відносно сталі X70.

Швидкість корозії сталі X70 в розчині після витримування в ньому покриву за температури 20°C впродовж 1 місяця зростає майже на ~13 % (від ~0,089 мм/рік у вихідному розчині до ~0,101 мм/рік у розчині, що контактував з покривом), у розчині, що контактував з покривом протягом 2,5 місяців – зменшується на ~76 % – до ~0,021 мм/рік. За температури 60°C закономірності зміни швидкості корозії сталі X70 схожі: збільшення до ~0,09 мм/рік через 1 місяць з наступним зменшенням до ~0,012 мм/рік – через 2,5 місяці.

Вплив катодної поляризації на властивості покриву досліджували методом катодного відшарування на розробленому в цій роботі лабораторному стенді. За потенціалу -1,45 В процес деградації перебігає інтенсивніше, ніж за потенціалу корозії, що підтверджено збільшенням радіусу відшарування покриву від основи (від ~11,0 мм при $E_{\text{кор}}$ до ~17,0 мм при -1,45 В). Під час відшарування покриву при катодній поляризації приблизно на ~15 % зросло рН розчину (від ~9,6 при $E_{\text{кор}}$ до ~11,0 при потенціалі -1,45 В), втричі збільшилася його електропровідність (від $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ См/см до $\sim 6,6 \cdot 10^{-3}$ См/см, відповідно), підвищилася корозивність відносно сталі X70 (швидкість корозії зросла від ~0,167 мм/рік до ~0,234 мм/рік).

Отже, умовами, які спричиняють деградацію полімерного стрічкового покриву, визначено контакт з корозивним середовищем, наявність дефекту та катодна поляризація. Підвищення температури прискорює процес, при збільшенні тривалості випробувань процес деградації покриву продовжує розвиватися. Деградацію ґрунтувального шару підтверджено методом інфрачервоної спектроскопії. Присутність продуктів деградації покриву у розчині підвищує схильність сталі X70 до крихкого руйнування.

У *п'ятому розділі* наведено результати корозійно-механічних досліджень, високоміцної сталі X80 для магістральних газопроводів в умовах комплексного протикорозійного захисту. Порівняльні дослідження корозійних, електрохімічних та корозійно-механічних властивостей трубної сталі категорій X70 та X80, границі міцності яких складали 640 МПа – для X70 і 691 МПа – для X80 у модельному ґрунтовому електроліті показали, що тривкість проти суцільної корозії практично однакова (~0,023 мм/рік для X80 і ~0,022 мм/рік для X70).

Методом інфрачервоної спектроскопії дослідили стрічковий покрив у вихідному стані та після випробувань. Встановили, що після його витримування за підвищеної температури, або після випробувань методом катодного відшарування, поліетиленова стрічка впродовж 2,5 місяців випробувань не деградує. В спектрах з'являються смуги неорганічних наповнювачів карбонату кальцію і тальку, які входять до складу ґрунтувального шару, що вказує на початок його деградації. Процес деградації ґрунтувального шару викликає зміну властивостей розчину (рН, електропровідності та корозивності відносно сталі X70). У розчині, в якому наявні продукти деградації стрічкового покриву відзначено підвищення схильності сталі X70 до корозійного розтріскування, оцінено за коефіцієнтом K_s .

Для сталі X80 спостерігається зниження потенціалу виділення водню до 0,850 В порівняно зі сталлю X70, для якої цей потенціал дорівнює -0,950 В. Це можна пояснити особливостями формування поверхневого шару під час виготовлення сталевого листа. Механізм анодного розчинення залишається незмінним та визначається швидкістю відновлення кисню. За результатами тривалих корозійно-механічних досліджень (впродовж 1 року) у модельному ґрунтовому електроліті при постійній деформації та катодного потенціалу -1,0 В показано, що для X70 властива під поверхнева корозія, для X80 – міжкристалічне руйнування, спричинене воднем. На сталі X70 виявлені окремі ділянки під поверхневої корозії протяжністю до ~280 мкм глибиною до ~17 мкм і локальні ділянки міжзеренного руйнування, спричиненого воднем, яке розповсюджується на довжину ~132 мкм та глибину ~430 мкм. В при поверхневих шарах сталі X80 після випробувань виявлені окремі ділянки міжзеренного руйнування довжиною до ~495 мкм та глибиною до ~7 мкм. Такий вид корозії, може бути обумовлений проникненням водню, що утворюється в електроліті під дією катодної поляризації, в метал. Для точнішого оцінювання схильності сталі різної категорії міцності до корозійного розтріскування вважали доцільним порівнювати саме ці ділянки. Запропоновано коефіцієнт, який ґрунтуються на аналізі часу від початку руйнування до повного руйнування зразка у повітрі та у розчині K_t . Такі закономірності руйнування свідчать про те, що при інших одинакових умовах X80 більш схильна до крихкого руйнування, що підтверджено характером зламів зразків. З аналізу результатів досліджень встановили: для сталі більшої міцності різниця у схильності до корозійного розтріскування при катодному захисті проявляється вже за мінімального захисного потенціалу -0,75 В та збільшується при його зміщенні до більш від'ємних значень. Застосування цього коефіцієнту дасть змогу отримати дані про порівняльну схильність трубної сталі до корозійного розтріскування при одинаковій комбінації чинників цього явища. Встановлені закономірності схильності сталі підвищеної міцності до корозійного розтріскування застосовані під час розроблення зміни № 1 до ДСТУ 4219.

В комплексі досліджень цього розділу вивчено особливості деградації за потенціалу поляризації - 1,45 В полімерних захисних покривів: стрічкового та покривів нового покоління на поліуретановій та епоксидній основах, нанесених на сталі X70 та X80. Показано, що за температури 20⁰С радіуси відшарування дорівнюють, відповідно: ~13,5 мм та ~13,2 мм для поліуретанового, ~2,3 мм і ~3,7 мм для епоксидного покривів. Тобто ступінь відшарування визначається тільки властивостями покривів і не залежить від властивостей сталі. Цей висновок є важливим, якщо трубопровід з такими покривами експлуатується на відстані від компресорної станції більше 5 км, оскільки на такій

відстані температура стінки труби наближена до температури ґрунту, в якому він прокладений.

Дослідили вплив розміру штучного дефекту (6 та 20 мм) на деградацію покривів за катодної поляризації. Встановлено, що при збільшенні розміру дефекту в ~3,3 рази для різних типів покривів радіус відшарування зростає, але по різному: для поліуретанового на сталі X70 – на ~ 14 %, на сталі X80 – на ~31,5 %, для епоксидного на сталі X70 – на ~20 %, на сталі X80 – на ~44 %. Відзначено, що й за більшої площині дефекту епоксидний покрив виявився стійкішим при катодній поляризації.

У шостому розділі наведено результати вивчення механізму корозійного розтріскування трубної сталі X70 у модельному ґрутовому електроліті в умовах катодного захисту, а також впливу катодної поляризації на захисні властивості полімерних покривів у різному стані (нових і штучно зістарених). За результатами аналізу властивостей сталі встановлено, що при зміщенні катодного потенціалу до більш від'ємних значень змінюється механізм корозійного розтріскування.

У руйнуванні превалює в'язка складова з окремими короткими розшаруваннями до ~10 %. Можна припустити, що утворений за катодної поляризації водень не активно залучається до процесу руйнування. Як наслідок, і береги тріщини, і її вершина зазнають анодного розчинення. Анодне розчинення вершини тріщини є визначальним в цьому діапазоні потенціалів, і корозійне розтріскування розвивається за механізмом локального анодного розчинення. Концентрація водню, який проникає в сталь, зростає від ~0,5 до ~2,5 ммол/дм³. В цій області потенціалів вершина тріщини перебуває у стані анодного розчинення, а береги тріщини знаходяться в умовах катодної поляризації. На фрактограмі поверхні руйнування з'являються ознаки крихкого руйнування, частка квазікрихких розшарувань збільшується до ~ (15-30) %. За потенціалу, який є більш від'ємним, ніж -1,05 В, у вершині тріщини та на її берегах прискорюється відновлення водню та його проникнення в сталь від ~2,5 до ~24,2 ммол/дм³.

Під час розвитку тріщини у її вершині утворюється оголена поверхня металу, тому вершина тріщини завжди перебуває в не рівноважному електрохімічному стані. На її берегах утворюється шар продуктів корозії, під яким перебігає електрохімічна реакція. Оскільки за різних умов, які залежать від рівня катодної поляризації, превалює один або інший механізми, різний електрохімічний стан між вершиною тріщини та її берегами вказує на механізм корозійного розтріскування. При зміщенні потенціалу до більш від'ємних значень ступінь пластичної деформації зразків менша, коефіцієнт схильності до корозійного розтріскування K_S зростає інтенсивніше – від ~1,11 до ~1,60. Механізм водневого окрихчення починає домінувати над анодним розчиненням. Це підтверджується збільшенням частки крихкої складової в зламі понад ~45 %, погіршенням пластичних властивостей сталі, на що вказує ріст коефіцієнта K_S – від 1,60 до 2,90. При подальшому зміщенні потенціалу, наприклад, до -1,2 В, домінує катодна реакція відновлення водню і на вершині тріщини і на її берегах, що й призводить до збільшення вмісту водню в металі, сприяючи розвитку крихкого руйнування та втраті пластичності сталі.

Отже, зниження катодного потенціалу від -1,45 В до -0,75 В (-0,8 В) за підвищеної температури 50⁰C (70⁰C) сприяє збереженню захисних властивостей покривів (оцінених за показником радіусу відшарування): стрічковим новим і штучно зістареним – в ~9,4 і ~26,9 разів відповідно; новим гібрид-епоксидним – в ~3,3 рази, штучно зістареним – в ~1,7 разів; новим та штучно зістареним поліуретановим – більше ніж в ~20 разів. Узагальнені підходи щодо нанесення сучасних захисних покривів, властивості яких задовільняють вимогам ДСТУ 4219, використані при розробленні ДСТУ-Н Б А.3.1-29.

У сьомому розділі на основі результатів досліджень розтріскування сталей магістральних газопроводів в умовах комплексного протикорозійного захисту наведено розроблену методику визначення потенційно корозійно-небезпечних ділянок в умовах катодного захисту на діючих магістральних газопроводах України та приклад реалізації цієї методики. В основу методики покладена нова концепція комплексного обстеження й

діагностики МГ, в якій використовується аналіз даних проектної, виконавчої та експлуатаційної документації на газопровід, оброблення результатів наземного технічного діагностування і обстежень в шурфах. Згідно з концепцією, необхідними і достатніми умовами початку та розвитку корозійного розтріскування магістрального газопроводу є наявність на ділянці, що обстежується, трьох основних чинників певної інтенсивності, які прийняті основними, та умовно названі: «корозія» – і С ; «захист від корозії» – і Z ; «механічні напруження» – і N . На кожний з основних чинників впливають додаткові. Інтенсивність впливу основного і додаткових чинників на ділянці МГ різна, тому кожному чиннику поставлено у відповідність рекомендовані чисельні значення, які обрано з урахуванням схильності трубної сталі до корозійного розтріскування за впливу досліджених в цій роботі чинників. Ціль обстеження полягає у виявленні наявних на ділянці магістрального газопроводу чинників та визначені рівнів інтенсивності їх впливу.

Згідно з методикою, визначення потенційно корозійно-небезпечних ділянок магістральних газопроводів передбачає проведення таких заходів: аналіз проектної, виконавчої та експлуатаційної документації; виявлення зовнішніх та внутрішніх чинників за даними наземного технічного діагностування та лабораторних досліджень; аналіз результатів та оцінювання ймовірності корозійного розтріскування ділянки магістрального газопроводу; ранжування потенційно корозійно-небезпечних ділянок магістральних газопроводів по ступені схильності до корозійного розтріскування; технічне обстеження магістральних газопроводів у шурфах; розроблення рекомендацій щодо ремонту ділянки МГ з тріщиною подібними дефектами. Під час проведення обстеження МГ виконують комплекс робіт з визначенням умов і чинників, що сприяють корозійному розтріскуванню відповідно до вище наведених алгоритмів.

Для обчислення ймовірності корозійного розтріскування на ділянці магістрального газопроводу розроблено комп'ютерну програму із застосуванням електронних таблиць Excel.

Розроблена методика впроваджена для технічного діагностування лінійних ділянок магістральних газопроводів в ДК «Укртрансгаз».

У *восьмому розділі* наведено практичні рекомендації щодо захисту потенційно корозійно-небезпечних ділянок магістральних газопроводів діаметром (820- 1420) мм. Процедуру технічного діагностування магістральних газопроводів після шурфування рекомендується доповнити оцінюванням в лабораторних умовах схильності трубної сталі до корозійного розтріскування у модельному ґрутовому електроліті або водній витяжці з ґрунту з досліджуваної ділянки згідно з методикою розділу 3.

Захист на потенційно корозійно-небезпечних ділянках необхідно проводити згідно з вимогами ДСТУ 4219 захисними покривами, виготовленими в заводських чи базових умовах, класу В (дуже посиленого типу), таких конструкцій: тришаровий полімерний (ґрутовка на основі термореактивних смол, термоплавкий полімерний підшар, захисний шар на основі екструдованого поліолефіну), двошаровий полімерний (термоплавкий полімерний підшар, захисний шар на основі екструдованого поліолефіну), на основі поліуретанів. Покриви повинні бути стійким за температури газопроводу більше 50⁰С, (клас температурної стійкості ГТ) та мати максимальну температуру експлуатації 60⁰С. Стрічкові покриви на таких ділянках застосовувати не дозволяється. Вимоги до захисних покривів класу В наведені в ДСТУ 4219 (табл. 2). Основним критерієм до вибору захисного покриву є його стійкість проти катодного відшарування.

Розроблені практичні рекомендації щодо технічного діагностування та захисту потенційно корозійно-небезпечних ділянок магістральних газопроводів застосовано під час розроблення СОУ 60.3-30019801-070 «Магістральні газопроводи. Методика визначення технічного стану захисного покриву та корозійного стану зовнішньої поверхні труби», ДСТУ Н Б А.3.1-29 «Магістральні трубопроводи. Нанесення захисних покривів та

улаштування теплової ізоляції.», зміни № 1 до ДСТУ 4219 «Трубопроводи сталеві магістральні. Загальні вимоги до захисту від корозії».

4. Новизна результатів дослідження.

До наукової новизни результатів роботи слід віднести:

- вперше розроблено та застосовано новий науковий підхід щодо встановлення впливу різних чинників на закономірності процесу корозійного розтріскування сталі трубного сортаменту (на прикладі сталі X70), який ґрунтуються на даних лабораторного моделювання умов їх дії, тотових умов експлуатації магістрального газопроводу, що дозволяє оцінити схильність сталі до корозійного розтріскування;
- виявлено комплекс чинників, які спричиняють деградацію полімерних покривів (зокрема стрічкового), нанесених на трубну сталь, при катодному захисті, а саме: наявність дефекту в покриві, його контакт з корозійним середовищем та катодна поляризація. Відмічено, що підвищення температури від 20⁰C до 50⁰C прискорює цей процес, який розвивається у часі. Після 2,5 місяців контакту з середовищем ґрунтувальний шар стрічкового покриву визнає деградації, що підтверджено появою в інфрачервоних спектрах смуг неорганічних наповнювачів – карбонату кальцію і тальку. Властивості поліетиленової стрічки залишаються стабільними. Присутність продуктів деструкції ґрунтувального шару у випробувальному розчині викликає зростання схильності сталі X70 до корозійного розтріскування;
- вперше визначено, що за умови тривалої дії деформації металу в модельному ґрутовому електроліті при катодній поляризації за потенціалу -1,0 В для сталі X70 відбувається під поверхнева корозія, а для X80 – міжзерenne руйнування, спричинене проникненням водню в метал. Швидкість розвитку процесу розтріскування сталі X80 в умовах катодної поляризації за потенціалу -1,0 В, яка характеризується довжиною спадних ділянок кривих руйнування, більша, ніж для сталі X70, що вказує на її вищу схильність до крихкого руйнування;
- вперше встановлено, що деградація поліуретанового та епоксидного покривів на сталі X70 та X80 у розчині 3 % NaCl, при катодному захисті, за умов 20⁰C визначається тільки властивостями покривів і потенціалом поляризації. Температурні зміни (від 20⁰C до 50⁰C) повітря прискорюють катодне відшарування покривів від сталі X80, що обумовлено будовою при поверхневого шару та зменшенням (за абсолютним значенням) потенціалу виділення водню на цій сталі;
- вперше встановлено, що механізм корозійного розтріскування трубної сталі X70 в модельному ґрутовому середовищі змінюється залежно від значення захисного потенціалу. Виявлено три області потенціалів, в яких корозійне розтріскування сталі перебігає за різними механізмами: локального анодного розчинення (більш позитивних, ніж -0,75 В); локального анодного розчинення та водневого окрихчення (від -0,75 В до -1,05 В); водневого окрихчення (більш від'ємних, ніж -1,05 В).

5. Цінність отриманих результатів для науки і практики.

Практична цінність роботи Ниркової Л. І. полягає в розробленні та впровадженні нової методології оцінювання схильності трубної сталі X70 до корозійного розтріскування в умовах моделювання комплексу зовнішніх і внутрішніх чинників, підтверджену патентом України на винахід 107381; введені коефіцієнту K_S , який враховує зміну пластичних властивостей металу у корозійному середовищі у порівнянні з його властивостями у повітрі.

Крім того, обґрунтовано та запропоновано новий спосіб оцінювання схильності сталі різної категорії міцності до корозійного розтріскування в умовах катодного захисту та введено коефіцієнт K_T , в якому враховано зміну довжини ділянок від початку до повного руйнування зразка в повітряних умовах порівняно з розчином (захищена патентом на винахід 119578).

Показано, що за циклічної зміни температур (від 20⁰C до 50⁰C) катодне відшарування захисних покривів від сталі X80 інтенсивніше, ніж від X70: поліуретанового на ~39 %, епоксидного на ~9 %, стрічкового на ~34 %; найбільш стійким в умовах катодного відшарування визначено епоксидний покрив.

Експериментально доведено, що підтримування захисного потенціалу на рівні -1,45 В призводить до швидшого відшарування штучно зістареного стрічкового покриву порівняно з новим (приблизно у ~3 рази). Катодне відшарування нових і штучно зістарених термореактивних покривів нового покоління (гібрид-епоксидний типу Polyclad 975 Н та поліуретановий типу Polyclad 777) за максимального захисного потенціалу практично не відрізняються. Зниження захисного потенціалу до мінімального значення сприяє збереженню захисних властивостей полімерними покривами: новим і штучно зістареним стрічковим – в ~9,4 і ~26,9 разів відповідно; новим гібрид-епоксидним – в ~3,3 рази, штучно зістареним – в ~1,7 разів; новим та штучно зістареним поліуретановим – більше, ніж в ~20 разів.

Розроблено та впроваджено методику визначення потенційно корозійно-небезпечних ділянок в умовах катодного захисту на діючих магістральних газопроводах України (введено в дію з 01.09.2010 р. наказом ДК «Укртрансгаз» №323 від 04.08.2010 р.).

Основні висновки, рекомендації та пропозиції дисертаційної роботи знайшли своє відображення в СОУ 60.3-30019801-070, ДСТУ Н Б А.3.1-29, зміни № 1 до ДСТУ 4219.

6. Повнота викладення матеріалу в опублікованих працях.

Дисертація Ниркової Л. І. складається із анотації, вступу, восьми розділів, загальних висновків, списку літературних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 363 сторінки (з них 272 сторінки основного тексту) з 72 рисунками, 46 таблицями бібліографічним списком із 373 найменувань та 3 додатків, що відповідає вимогам до обсягу та структури докторських дисертацій.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 50 друкованих праць, у тому числі 30 статей у наукових фахових виданнях України та інших держав (з них 4 статті без

співавторів), з яких 8 статей індексовані міжнародними науково метричними базами, зокрема Scopus та Web of Science; 3 патенти України на винахід, 2 патенти України на корисну модель, 2 нормативних документи у сфері захисту магістральних трубопроводів від корозії державного підпорядкування, 2 методики, 1 стандарт організації України, 16 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій. Матеріали дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних конференціях: «Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів» (1998 р. – 2018 р., м. Львів), «Електрохімічний захист і корозійний контроль» (2001 р., Сєверодонецьк), «ISE Satellite Student Regional Symposium on Electrochemistry (2016-2019 рр., м. Київ). Опубліковані роботи повністю відображають зміст дисертації.

Тема та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії. Оформлення дисертаційної роботи відповідає чинним вимогам.

7. Мова та стиль дисертації.

Дисертаційна робота написана державною мовою, поділ на розділи логічний і обґрунтований. В роботі застосована загально визнана наукова термінологія, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття. Результати роботи добре проілюстровані фотографіями, діаграмами, таблицями, що сприяє розумінню викладених результатів.

8. Відповідність автореферату змісту дисертаційної роботи

Автореферат за структурою та оформленням відповідає встановленим вимогам МОН України. В ньому досить повноцінно відображені головні результати дисертаційної роботи та наукові здобутки автора.

9. Зauważення по роботі.

1. Згідно з класифікацією типів корозійного розтріскування, при pH, близьких до нейтральних, розтріскування має транскристалітний характер. Однак у розділі 3 дисертації наведено, що після тривалих корозійно-механічних досліджень спостерігали розвиток міжкристалічної тріщини, що суперечить загальним закономірностям.

2. В роботі деградацію захисних покривів досліджували методом катодного відшарування. Зазвичай використовують магнієвий анод, який при поляризації утворює гідратований оксид магнію, що може забруднювати розчин. В роботі не чітко вказано, чи був врахований вплив цього чинника при вивченні властивостей покриву методом інфрачервоної спектроскопії.

3. В роботі запропоновано коефіцієнт оцінювання схильності до корозійного розтріскування та критерій схильності до корозійного розтріскування на прикладі сталі X70. Однак не обґрунтовано, наскільки цей підхід універсальний, для прикладу, стосовно зварних з'єднань та інших типів трубних сталей, які є на магістральних газопроводах України.

4. В роботі представлені результати досліджень щодо впливу захисного потенціалу на наводнювання трубної сталі. Але не зазначено, чи можна за допомогою розробленої у роботі установки визначати проникнення водню в метал в умовах напруженого стану, особливо, для зварних з'єднань, що сприяло би вивченю механізму

водневого розтріскування.

5. Під час тривалої експлуатації відбувається деградація властивостей металу. В роботі недостатньо проаналізовані чинники, які впливають на деградацію трубних сталей, зокрема, роль водню.

6. Широко відомими фактом є те, що корозійне розтріскування ініціюється на лефектах структури та неметалевих включеннях. В роботі не вказано, як ураховано вплив цього чинника під час лабораторних досліджень.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку та високу науково-практичну цінність дисертаційної роботи Ниркової Л. І., яка вирішує науково-прикладну проблему – встановлення закономірності корозійного розтріскування сталей магістральних газопроводів при їх катодному захисті, що розширює розуміння механізму корозійного розтріскування магістральних газопроводів, та дає можливість науково-обґрунтованого підходу до вибору способів його попередження.

Висновок.

Дисертаційна робота Ниркової Людмили Іванівни «Теоретико-експериментальні засади оцінювання та запобігання корозійному розтріскуванню сталей магістральних газопроводів в умовах їх катодного захисту», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, є завершеною науковою працею, надає вагомий внесок в науку і практику щодо хімічного опору матеріалів і захисту від корозії. В ній подані нові наукові та практичні результати щодо шляхів вирішення складної прикладної проблеми – встановлення закономірності корозійного розтріскування сталей магістральних газопроводів в умовах катодного захисту, що розкриває механізм корозійного розтріскування магістральних газопроводів і обґрутує підходи до раціонального вибору способів його запобігання.

Дисертація Ниркової Л. І. за своєю актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, результатами, висновками, їх практичною цінністю та реалізацією в промисловості повністю відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015 р.), а її автор, **Ниркова Людмила Іванівна**, заслуговує присудження наукового ступеня **доктора технічних наук** за спеціальністю 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук,
професор кафедри
газонафтопроводів і газонафтосховищ
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу
МОН України

Ю. В. Банахевич

Підпис д.т.н. Банахевича Ю.В. засвідчує.

Вчений секретар університету

В.Р. Процюк

