

ВІДГУК

офіційного опонента **Ниркової Людмили Іванівни**
на дисертаційну роботу **Греділь Мирослави Іванівни**
на тему **«Науково-методологічні засади оцінювання впливу
корозійно-водневих чинників на експлуатаційну пошкодженість
вуглецевих та низьколегованих сталей»**,
подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
зі спеціальності 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії

Актуальність теми дисертаційної роботи

Вуглецеві та низьколеговані сталі різної міцності широко застосовують у багатьох галузях промисловості. З них виготовлені конструкційні елементи відповідальних об'єктів тривалої експлуатації, зокрема, трубопроводів, крім того, вони є невід'ємним компонентом композиційних матеріалів, таких як залізобетон. До недоліків такого класу сталей відносять їх високу чутливість до дії агресивних корозивно-наводнювальних середовищ, особливо під впливом експлуатаційних навантажень. За таких умов можливе інтенсивне наводнювання металу, що є найвагомим чинником водневого окрихчення та розвитку експлуатаційної пошкодженості сталей тривало експлуатованих конструкцій і часто спричиняє їх неконтрольоване крихке руйнування. Необхідний системний підхід до аналізу комплексного впливу газоподібного та електролітично генерованого водню на руйнування сталей. Тому встановлення закономірностей впливу водневого чинника на механізм розвитку пошкодженості конструкційних сталей зазначеного класу за тривалої дії експлуатаційних чинників та розроблення на їх основі ефективних методів оцінювання, прогнозування та підвищення опору руйнуванню є надзвичайно важливою та актуальною науково-технічною проблемою, вирішення якої у рамках хімічного опору матеріалів становить суть дисертаційної роботи М.І. Греділь.

Актуальність дисертаційного дослідження підтверджується інтеграцією з низкою науково-дослідних робіт, що виконувалися в рамках бюджетних тем

згідно з тематичними планами та цільовими комплексними програмами НАН України, а також у рамках договорів з МОН України, грантів НАТО, НФДУ та госпдоговорів, в яких здобувач брала участь як відповідальний виконавець та виконавець. Це, зокрема, НДР «Закономірності впливу експлуатаційних та корозійних чинників на деградацію структури і характеристики опору крихкому руйнуванню конструкційних сталей» (номер держреєстрації 0112U002788), «Встановлення металознавчих, механічних та електрохімічних інформативних ознак діагностування корозійно-водневої деградації конструкційних сталей» (номер держреєстрації 0118U000462), «Дослідження ролі водневого чинника в експлуатаційній деградації конструкційних сталей» (номер держреєстрації 0121U108961), «Оцінювання фізико-хімічних та фізико-механічних механізмів взаємодії газоподібного водню з трубними сталями для безпечної експлуатації існуючих газопроводів під час транспортування ними зеленого водню» (номер держреєстрації 0123U104823), «Дослідження закономірностей розвитку пошкоджень в тривало експлуатованих конструкційних сталях за впливу різних за природою наводнювальних середовищ» (номер держреєстрації 0124U000911), «Розроблення методів оцінювання експлуатаційної деградації властивостей сталей магістральних трубопроводів з використанням підходів механіки руйнування і хімічного опору матеріалів» (номер держреєстрації 0110U004564), «Розроблення методу моделювання експлуатаційної деградації властивостей сталей магістральних трубопроводів» (номер держреєстрації 0113U004221), «Розроблення експрес-методу лабораторної симуляції експлуатаційної деградації конструкційних сталей енергетики для оцінювання їх схильності до корозійного розтріскування» (номер держреєстрації 0119U102078), «Розроблення методології оцінювання роботоздатності існуючих газопроводів для підвищення стійкості функціонування енергетичної системи України при транспортуванні зеленого водню» (номер держреєстрації 0123U103425) тощо.

Оцінка змісту та завершеності дисертації

Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, переліку використаних джерел із 357 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 375 сторінки. Робота є логічно структурованою, матеріал викладений послідовно, зміст проведених досліджень розкрито повністю. Наукові положення, висновки та рекомендації, наведені у роботі, є достатньою мірою обґрунтовані та експериментально підтверджені.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання роботи, конкретизовано об'єкт і предмет дослідження, наведено застосовані методи, відзначено наукову новизну та практичну цінність отриманих у роботі науково-технічних результатів, визначено зв'язок проведених досліджень із науковими програмами, темами, грантами. Наведено перелік публікацій за темою дисертаційної роботи, вказано особистий внесок здобувача, обсяг дисертаційної роботи.

У *першому розділі* представлено ґрунтовний аналіз літературних джерел щодо механізмів впливу водню на деградацію та зниження опору руйнуванню сталевих конструкцій за умов, які спричиняють розвиток у них пошкодженості. Виокремлено корозію як чинник виділення водню та інтенсифікації руйнування за механізмами водневого окрихчення. Описано прояви водневої крихкості сталей та наведено методичні підходи до оцінювання експлуатаційної деградації сталей. На завершення розглянуто існуючі підходи до сповільнення росту втомних тріщин у сталях на основі екранувальних ефектів, а також проблему цілісності сталевих арматур в залізобетоні за впливу корозивно-наводнювальних середовищ.

У *другому розділі* викладено застосовані здобувачем методики електрохімічних, механічних та корозійно-механічних випробувань, визначення вмісту водню, металографічних та фрактографічних досліджень, наведений перелік досліджених матеріалів та корозивних середовищ.

У *третьому розділі* запропоновано науково-методологічний підхід для вивчення впливу газоподібного водню на корозію та наводнювання металу

внутрішньої поверхні сталевих труб в умовах, що моделюють умови транспортування водню. Для аналізу цього впливу розроблено методику вивчення електрохімічної взаємодії металу з корозивним середовищем, яке насичували газоподібним воднем. Водень отримували методом електролізу води. Вивчали вплив таких чинників, як інтенсивність виділення водню, ефекти перемішування середовища та післядії водню, вплив тривалої експлуатації сталі. За допомогою розробленого підходу виявлено інтенсифікацію корозійних процесів на сталях у 4–5 разів за наявності у середовищі газоподібного водню, що спричинило водневе розтріскування сталі. Це логічно пояснено зміщенням рівноваги електрохімічних процесів на сталі у бік абсорбування водню металом. Пришвидшення корозії за дії водню істотніше проявлялося для експлуатованої сталі, ніж неексплуатованої, а відновлення її корозійної тривкості після усунення водневого чинника є меншим.

Четвертий розділ присвячено встановленню закономірностей окрихчення трубної сталі та її зварного з'єднання за умов посиленого абсорбування водню під час тривалої експозиції у водні з урахуванням умов експлуатації. Для цього розроблено методику напівнатурних випробувань, яка передбачає витримування зразків-свідків під тиском у трубі з воднем на стенді полігону, та відтворює кліматичні коливання температури, характерні для труб надземної частини газопроводу. Тут враховано чинник конденсації вологи на внутрішньої поверхні труби, що спричиняє корозію та наводнювання металу труби, та сприяє розвитку пошкодженості. Встановлено суттєве підвищення концентрації водню у сталі та зниження тріщиностійкості експлуатованого основного металу удвічі та зварного з'єднання утричі, що є нижче допустимого рівня. Також систематизовано умови випробувань металу тонкостінних труб для підвищення чутливості оцінювання його водневої крихкості, а саме: випробування поперечних зразків, їх мала товщина, визначення тріщиностійкості методом J -інтеграла.

У *п'ятому розділі* на основі закономірностей корозійно-водневої деградації властивостей тривало експлуатованих трубних сталей розкрито механізм та стадійність розвитку пошкодженості в сталях різної міцності за впливу водню. На цій основі розвинуто лабораторний метод їх пришвидшеної деградації, що враховує розвиток пошкодженості, та показано його застосовність для прогнозування схильності експлуатованих сталей до корозійно-механічного руйнування. Показано, що лабораторно деградовані та тривало експлуатовані трубні сталі різної міцності (17Г1С, Х60 та Х70) у модельному розчині NS4 характеризуються схожою схильністю до корозійного розтріскування та опором росту корозійно-втомних тріщин.

У *шостому розділі* розвинуто корозійно-механічний спосіб зупинки росту втомних тріщин у сталях. Він полягає у використанні розчину таніну як технологічного середовища, що подається у порожнину тріщини під час циклічного навантаження. Взаємодія таніну з берегами тріщини в умовах їх тертя зумовлює накопичення великої кількості нерозчинних продуктів, які заповнюють тріщину, створюючи ефект її закриття. Проаналізовано вплив різних чинників, зокрема частота циклічного навантаження, концентрація таніну, природа розчинника та матеріалу) на ефективність та застосовність запропонованого способу. Показано, що метод ефективний для сплавів на основі заліза. Його застосування дає змогу суттєво підвищити довговічність елементів конструкції за сумісної дії корозивних середовищ та циклічного навантаження.

У *сьомому розділі* проаналізовано вплив низки корозійно-водневих чинників на арматурні сталі та адгезивну міцність залізобетону. У роботі показано, як процес зміцнення арматурних прутків холодним волочінням впливає на їх корозійну тривкість, механізм корозійно-механічного руйнування та схильність до водневого окрихчення. Зокрема, виявлено більш високу електрохімічну активність зміцненого прутка порівняно з заготовкою (поляризаційний опір нижчий у 1,5 рази), а також суттєву відмінність в

електрохімічних характеристиках торцевої та бокової поверхонь прутка після холодного волочіння.

Тут запропоновано методичний підхід до оцінювання адгезивної міцності сталевий арматури з бетоном за впливу корозійно-водневих чинників, що діють на залізобетон під час експлуатації об'єктів. Виявлено проникання продуктів корозії углиб бетонної матриці за анодної поляризації у розчині з високим вмістом хлоридів та роз'яснено стадійність їх формування. Підсумовано, що як анодна, так і катодна поляризація арматури погіршує її адгезію з бетоном – у першому випадку внаслідок накопичення продуктів корозії на границі розподілу з подальшим розтріскуванням бетонної матриці, а в другому – через електроміграцію іонів у прилеглому до арматури бетонному шарі та виділення водню, що спричиняє його відшарування.

Висновки узагальнюють основні результати досліджень та відповідають змісту реферату. Додатки містять перелік отриманих патентів та актів упроваджень. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею.

Ступінь обґрунтованості та достовірності сформульованих у дисертаційній роботі наукових положень, висновків і рекомендацій

Дисертаційна робота характеризується чітким формулюванням проблеми та шляхів її вирішення, коректною постановкою завдань відповідно до мети роботи, широким застосуванням відомих та розроблених дисертанткою експериментальних методик для вирішення цих завдань та сучасних методів оброблення результатів. Викладені наукові положення, висновки та рекомендації є достовірними, ґрунтуються на всебічному аналізі великої кількості наукової літератури за темою дисертації та розробленій авторкою науково-інженерній методології, яка зосереджена на дослідженні з позицій хімічного опору матеріалів процесів розвитку експлуатаційної пошкодженості у сталях критичних об'єктів інфраструктури за тривалого впливу корозивно-наводнювальних середовищ. Надійність отриманих даних

підвищує верифікація результатів на основі напівнатурних досліджень зразків-свідків в умовах, що відтворюють експлуатаційні з огляду на можливий корозійно-наводнювальний вплив робочого середовища.

Наукова новизна дисертаційних досліджень

Основні результати, що складають наукову новизну дисертаційної роботи полягають у наступному.

1. Уперше встановлено вплив газоподібного водню на взаємодію трубних сталей з корозивно-наводнювальними середовищами, який проявляється у зміщенні рівноваги реакції $H_{\text{адс}} + H_{\text{адс}} \leftrightarrow H_2$ у бік адсорбованого водню, внаслідок чого інтенсифікується абсорбування водню металом за реакцією $H_{\text{адс}} \leftrightarrow H_{\text{абс}}$, знижується корозійна тривкість сталей та підвищується їх схильність до водневого розтріскування;

2. Уперше розкрито воднево-деформаційний механізм розвитку пошкодженості в трубних сталях, що полягає в утворенні дефектів та їх деформаційному рості під тиском акумульованого у них водню. Аргументовано полегшену реалізацію наведеного механізму у низькоміцних сталях порівняно з високоміцними через їх вищу деформівну здатність.

3. Уперше виявлено анізотропію електрохімічних характеристик зміцнених холодним волочінням арматурних прутків (поляризаційний опір у 3% розчині NaCl бокової поверхні вище в 1,7 разів порівняно з перерізом), яку пояснено різним структурно-напруженим станом уздовж та упоперек зміцнених прутків.

4. Уперше встановлено механізм корозійно-механічного руйнування гладких перлітних прутків на різних стадіях семиетапного холодного волочіння, який полягає у зародженні тріщини від бокової поверхні під дією водню на перших етапах і змінюється після третього етапу внаслідок одночасного формування додаткового осередку руйнування у центрі перерізу прутка з подальшим злиттям двох осередків.

5. Уперше обґрунтовано використання таніну як основи технологічного середовища для зупинки втомних тріщин у конструкційних сталях за швидкостей їх росту до $6 \cdot 10^{-7}$ м/цикл, механізм дії якого полягає в інтенсивній взаємодії таніну зі свіжоутвореною поверхнею берегів тріщини в умовах тертя та накопиченні твердих продуктів взаємодії у її порожнині, що створює штучний ефект закриття тріщини.

6. Розширено наукові знання про закономірності корозійно-водневого руйнування трубних сталей в умовах, наближених до експлуатаційних для надземних ділянок тонкостінних трубопроводів, що дало змогу оцінити схильність сталей до водневої крихкості під час тривалої експозиції у газоподібному водні за наявності навантаження та коливань температури, характерних для природно-кліматичних умов експлуатації.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи

Отримані в дисертаційній роботі результати досліджень, мають важливе прикладне значення як на загальнонаціональному, так і світовому рівні:

Метод пришвидшеної деградації сталей, що імітує експлуатаційну пошкодженість, використано ВП «Галремеренерго» АТ «ДТЕК Західенерго» для прогнозування фактичного технічного стану експлуатованих сталей об'єктів енергетики та обґрунтування висновку про можливість продовження їх експлуатації.

Результати досліджень впливу експлуатаційної деградації на циклічну тріщиностійкість трубних сталей покладено в основу методики комплексного діагностування стану матеріалу і залишкового ресурсу магістральних газопроводів, яку впроваджено в УМГ «Львівтрансгаз» ПАТ «Укртрансгаз».

Розроблено напівнатурну методику оцінювання водневої крихкості сталей надземних ділянок розподільчих газопроводів внаслідок тривалої експозиції у газоподібному водні. Для низькоміцних вальцьованих сталей систематизовано умови випробувань, які в комплексі підвищують чутливість

оцінювання опору водневій крихкості. Вивчення методики включено в навчальну програму підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю 185 – «Нафтогазова інженерія та технології» в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу МОН України.

Запропонований спосіб зупинки росту корозійно-втомних тріщин в конструкційних сталях використано у ТОВ «Порттехексперт» для подовження стадії росту тріщини у сталях конструкційних елементів портових кранів.

Розроблена експрес-методика оцінювання адгезивної міцності армованого бетону за впливу корозивно-наводнювальних середовищ дає змогу суттєво спростити та пришвидшити визначення міцності зчеплення арматури з бетоном.

Повнота викладу результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях і рефераті

Отримані наукові результати, що складають зміст дисертаційної роботи, повністю представлені в опублікованих дисертантом працях та апробовані на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 41 наукову працю, серед яких 29 статей у наукових фахових виданнях України та у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 21 у виданнях, що індексуються наукометричною базою даних Scopus та 18 – Web of Science). П'ять праць опубліковано у високорейтингових виданнях, віднесених до кватилів Q1 і Q2, а також 7 – у Q3, дев'ять робіт – матеріали чи тези доповідей міжнародних конференцій, три – патенти на корисну модель.

Відповідність дисертації встановленим вимогам

Дисертаційна робота відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук відповідно до п. п. 7,

8 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197 із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ від 19.05.2023 р. № 502, від 03.05.2024 р. № 507 та від 30.07.2025 р. № 928.

У матеріалах дисертації не виявлено ознак академічного плагіату та фальсифікації.

Стиль викладення дисертаційної роботи є логічним, речення лаконічні та місткі, що забезпечує легке сприйняття матеріалу. Для написання дисертації використано сучасну науково-технічну мову.

Зауваження

1. У роботі зазначено, що відносно звуження чутливіше для оцінювання водневого окрихчення трубної сталі з використанням пластинчастих зразків (стор. 168). Поясніть, будь ласка, на підставі чого вплив тривалості експонування у газоподібному водні на пластичність металу, відібраного на різних ділянках труби залежно від стану матеріалу оцінювали здебільшого за відносним подовженням (пп. 4.7.6).

2. Автором на схемі стадійності розвитку експлуатаційної пошкодженості у трубній сталі (рис. 5.8) неметалеві включення зображені неправильної, однак близької до сферичної форми. Водночас відомо, що в трубних сталях включення суттєво видовжені у напрямі вальцювання, що варто було б відтворити на схемі.

3. Зварне з'єднання зі сталі ВСтЗсп, яке досліджується у розділі 4, виконано високочастотним зварюванням, тому ширина зварного шва і зона термічного впливу (ЗТВ) в ньому не перевищують 2 мм. Поясніть, яку саме зону розглядали як ЗТВ, як виготовляли зразки із ЗТВ для випробувань на ударну в'язкість і місце розташування надрізу відносно шва. Як розташовувався зварний шов відносно осі труби під час випробувань на розтяг зварного з'єднання зі сталі ВСтЗсп?

4. Границя міцності труб зі сталі 17Г1С не перевищує 520 МПа, а KCV^{15} может коливатися від 150 до більше 200, що свідчить про неоднорідність цієї сталі. На рис. 5.6,а наведено, границя міцності 560 МПа. Поясність, будь ласка, для якого трубопроводу наведено ці результати (нафтопровід, магістральний чи промисловий газопровід) і з якої ділянки труби виготовляли зразки, оскільки для труб з лінійної частини магістральних газопроводів не властива настільки сильна деградація механічних властивостей.

5. Зростання опору зародження тріщини на ранніх етапах холодного волочіння арматурних прутків пояснено низкою чинників, серед яких зменшення шорсткості поверхні, однак замірів шорсткості не наведено.

6. Для порівняння показників механічних властивостей труб бажано було б навести нормовані стандартами значення, щоб зрозуміти, чи свідчать визначені значення показників про суттєве погіршення властивостей, чи знаходяться в межах розкиду.

Зазначені зауваження не зменшують загальної позитивної оцінки та високої науково-практичної цінності дисертаційної роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Греділь Мирослави Іванівни «Науково-методологічні засади оцінювання впливу корозійно-водневих чинників на експлуатаційну пошкодженість вуглецевих та низьколегованих сталей» є цілісним та завершеним кваліфікаційним науковим дослідженням, в якому вирішена вагома науково-технічна проблема, а саме встановлено закономірності та механізми корозійно-водневого руйнування вуглецевих та низьколегованих сталей, що спричинені експлуатаційною пошкодженістю, і розроблено методи її оцінювання і прогнозування, а також підвищення опору руйнуванню. Робота виконана на високому науковому рівні, оформлена згідно з чинними вимогами, і повністю відповідає паспорту спеціальності 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії. Основні положення дослідження належно обґрунтовані, їх достовірність підтверджено

результатами лабораторних та напівнатурних випробувань. Дисертація характеризується цілісністю структури, єдністю змісту, чіткою постановкою завдань досліджень та системністю їх виконання, відповідає принципам академічної доброчесності. Висновки за окремими розділами та загальні висновки відповідають визначеній меті дослідження і сформульованими завданням. Реферат дисертації повною мірою відображає її основні наукові та практичні положення. За своєю актуальністю, повнотою викладення, науковою новизною та практичною цінністю отриманих результатів досліджень дисертаційна робота повністю відповідає вимогам до робіт на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме п. п. 7, 8 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року № 1197 із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р. та № 928 від 30.07.2025 р., а її автор Греділь Мирослава Іванівна заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії.

Офіційний опонент,
завідувач відділу зварювання
газонафтопровідних труб
Інституту електрозварювання
ім. Є. О. Патона НАН України,
доктор технічних наук, старший дослідник

 Людмила НИРКОВА

Підпис Л. Ниркової засвідчую:
Вчений секретар Інституту
к.т.н.



Ілля КЛОЧКОВ

Отримано
06.10.25 