

## ВІДГУК

**офіційного опонента О. Е. Чигиринець**

на дисертаційну роботу М. І. Греділь

«Науково-методологічні засади оцінювання впливу корозійно-водневих чинників на експлуатаційну пошкодженість вуглецевих та низьколегованих сталей», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії

### **Актуальність теми дисертаційної роботи.**

Вуглецеві та низьколеговані сталі відзначаються підвищеною чутливістю до дії агресивних корозивних середовищ, що часто слугує викликом при обґрунтуванні безпечної тривалої експлуатації елементів конструкцій. Особливо небезпечним можна вважати поєднання дії корозійного та водневого чинників. Це можливо, якщо корозія сталей виступає джерелом їх наводнювання, або газоподібний водень змішується з корозивним середовищем. Загальновідомо, що втрата робоздатності конструкцій з таких сталей великою мірою зумовлена пошкодженістю. Процес її розвитку багатофакторний, однак прояв чинників хімічного опору матеріалів слід вважати визначальними, попри значну роль напружено-деформованого стану, спричинену як зовнішнім навантаженням, так і створенням внутрішніх залишкових напружень від дії агресивних середовищ. Зазначені особливості на сьогодні недостатньо розкриті та проаналізовані і, зважаючи на їх виняткову важливість, це вимагає спеціального наукоємного дослідження, що становить суть дисертаційної роботи М. І. Греділь, спрямованої на вирішення актуальної науково-технічної проблеми. Вона полягає у встановленні закономірностей та механізмів корозійно-водневого руйнування вуглецевих та низьколегованих сталей, спричинених експлуатаційною пошкодженістю за дії агресивних середовищ, розроблення методів її оцінювання і прогнозування, та розв'язанні низки супутніх завдань: оцінки впливу пошкодженості на корозійно-механічне руйнування, підвищення опору руйнуванню за дії корозійно-механічного чинника.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.**

Доцільність та своєчасність дисертаційної роботи М. І. Греділь підтверджена зв'язком з темами НДР, які виконувалися у відповідності з планами науково-дослідних робіт у відділі діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України: «Дослідження впливу попередньої пластичної деформації на корозійно-водневу деградацію низьколегованих сталей», № 0109U002653; «Закономірності впливу експлуатаційних та корозійних чинників на деградацію структури і характеристики опору крихкому руйнуванню

конструкційних сталей», № 0112U002788; «Розроблення науково-методичних підходів до консервативного оцінювання корозійно-водневої деградації конструкційних сталей за їх характеристиками опору крихкому руйнуванню», № 0115U000119; «Встановлення металознавчих, механічних та електрохімічних інформативних ознак діагностування корозійно-водневої деградації конструкційних сталей», № 0118U000462, «Дослідження ролі водневого чинника в експлуатаційній деградації конструкційних сталей», № 0121U108961; «Дослідження закономірностей розвитку пошкоджень в тривало експлуатованих конструкційних сталях за впливу різних за природою наводнювальних середовищ», № 0124U000911; «Розроблення методів оцінювання експлуатаційної деградації властивостей сталей магістральних трубопроводів з використанням підходів механіки руйнування і хімічного опору матеріалів», № 0110U004564; «Розроблення методу моделювання експлуатаційної деградації властивостей сталей магістральних трубопроводів», № 0113U004221; «Розроблення методу оцінювання роботоздатності та залишкової довговічності магістральних трубопроводів з експлуатаційним макророзшаруванням», № 0116U006343, а також НДР у рамках договорів з іншими організаціями: «Розробка новітніх методів для недопущення виходу з ладу трубопроводів через порушення безпеки», № 0215U000156; «Розроблення експрес-методу лабораторної симуляції експлуатаційної деградації конструкційних сталей енергетики для оцінювання їх схильності до корозійного розтріскування», № 0119U102078; «Розроблення новітніх методів для запобігання руйнувань трубопроводів задля безпеки»; «Розроблення методології оцінювання роботоздатності існуючих газопроводів для підвищення стійкості функціонування енергетичної системи України при транспортуванні зеленого водню»; «Оцінювання фізико-хімічних та фізико-механічних механізмів взаємодії газоподібного водню з трубними сталями для безпечної експлуатації існуючих газопроводів під час транспортування ними зеленого водню», № 0123U104823, в яких автор була відповідальним виконавцем чи виконавцем.

### **Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.**

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується коректною постановкою завдань, застосуванням сучасних методів експериментальних досліджень, високою точністю вимірювання показників, статистичним обробленням отриманих експериментальних даних, графічно-аналітичною ілюстрацією результатів досліджень, їхньою відтворюваністю, узгодженістю з відомими практичними та теоретичними результатами вітчизняних та закордонних авторів, коректним відтворенням експлуатаційної деградації відомими та розробленими методиками. Зміст дисертації викладено з

урахуванням існуючих теорій фундаментальних наук та надбань практики, логічно та послідовно.

**Оцінювання змісту дисертації, її завершеності та дотримання автором принципів наукової доброчесності.**

Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел та низки додатків.

У *вступі* дисертаційної роботи обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета та завдання роботи, вирішення яких забезпечує досягнення її мети. Зазначено наукову новизну роботи та її практичну цінність, яка підтверджена апробацією розробок. Наведено інформацію щодо особистого внеску здобувача, зазначено повноту викладу результатів роботи в публікаціях, їх апробація на наукових форумах, а також обсяг та зв'язок із науковими програмами та планами, в яких дисертантка брала участь при підготовці дисертації.

У *першому розділі* викладено аналіз результатів досліджень корозійно-водневої деградації сталей, показано деструктивну роль робочих середовищ у розвитку мікропошкодженості, що спричиняє полегшення реалізації крихкого руйнування, зокрема корозійно-механічного. Описано відомі прояви та механізми водневого окрихчення сталей, а також методи оцінювання їх експлуатаційної деградації. Проаналізовано закономірності взаємодії арматурних сталей з корозивними середовищами, методи оцінки міцності їх зв'язку з бетоном. Зазначено відомі методи гальмування росту втомних тріщин штучним створенням їх закриття. Сформульовано мету та основні завдання дисертаційної роботи.

Об'єкти та методи дослідження подано у *другому розділі* роботи, де охарактеризовано сталі, використані в дослідженнях, наведено склад електролітів, методики корозійних, електрохімічних, механічних, корозійно-механічних досліджень, визначення концентрації водню в металах, а також електронно-мікроскопічних досліджень. Механічні властивості визначали першочергово для оцінки ступеня окрихчення сталей внаслідок дії корозійно-водневого чинника.

У *третьому розділі* викладено науково-методологічний підхід до дослідження впливу газоподібного водню на корозію та наводнювання трубних сталей в умовах, близьких до експлуатаційних, зважаючи на перспективи перепрофілювання наявних газопроводів для транспортування газоподібного водню. Експерименти проведено на сталях 17Г1С та Х70, аналізуючи зміни у їх корозійній тривкості та схильності до водневого розтріскування. Розроблено експериментальну методику, яка ґрунтується на вивченні електрохімічної взаємодії металу з корозивним середовищем, що імітує конденсовану вологу усередині труби, за його насичення газоподібним воднем, який генерували шляхом електролізу води. Вивчено вплив барботування водню різної інтенсивності, перемішування

середовища та сумісну дію цих чинників на корозійну активність металу. Встановлено, що наявність газоподібного водню у корозивному середовищі інтенсифікує корозію та наводнювання сталей. Пришвидщення корозії за дії водню істотніше для експлуатованої сталі, ніж неексплуатованої, а відновлення її корозійної тривкості після усунення водневого чинника є меншим. Зафіксовано незворотну зміну стану поверхні експлуатованого металу після експозиції у корозивному середовищі за барботування водню, тобто розвиток пошкодженості.

У *четвертому розділі* досліджено вплив тривалої експозиції у газоподібному водні на окрихчення трубної сталі та її зварного з'єднання з урахуванням умов експлуатації. Тут описано розроблену методику напівнатурних випробувань для оцінювання водневої крихкості сталей надземної частини газопроводів, яка відтворює кліматичні коливання температури як чинника наводнювання трубних сталей з боку внутрішньої поверхні. Її застосовано для металу різних ділянок газорозподільного трубопроводу, виготовленого з вуглецевої сталі ВСтЗпс (основний метал, поздовжнє зварне з'єднання, розтягнута зона гину). Зразки-свідки витримували упродовж тривалого (від 3 до 18 місяців) часу у технічному водні під тиском 0,3 МПа, попередньо оцінивши опір досліджуваного металу водневому окрихченню на пластичність та тріщиностійкість за електролітичного наводнювання. З використанням запропонованої методики напівнатурних випробувань встановлено суттєве підвищення концентрації водню у сталі (до семи разів), зниження тріщиностійкості експлуатованого основного металу удвічі та зварного з'єднання утричі, що є нижче допустимого рівня. Систематизовано умови випробувань металу тонкостінних труб, які дають можливість підвищити чутливість оцінювання водневої крихкості: вирізання зразків уперек до осі труби, мала товщина зразків (1,2 мм), оцінка тріщиностійкості методом  $J$ -інтеграла.

У *п'ятому розділі* розкрито вклад корозійно-водневого чинника у формуванні пошкодженості трубних сталей різних класів міцності під час експлуатації. Виділено воднево-деформаційний механізм та стадійність розвитку пошкодженості, що є переважальним для низькоміцних сталей з підвищеною деформівною здатністю. Розроблено метод пришвидщеної деградації сталей у лабораторних умовах, який враховує інтенсифікацію пошкодженості за дії водневого чинника та імітує її розвиток в експлуатаційних умовах. Розвинутий метод використано для прогнозування схильності експлуатованих низьколегованих трубних сталей різної міцності (X52, X60 та X70) до корозійно-механічного руйнування (корозійного розтріскування та корозійно-втомного руйнування). Показано, що лабораторно деградовані та тривало експлуатовані трубні сталі 17Г1С, X60 та X70 у модельному розчині NS4 характеризуються подібною схильністю до корозійного розтріскування та опором росту корозійно-втомних тріщин.

*Шостий розділ* присвячено розвитку корозійно-механічного способу підвищення опору руйнуванню вуглецевих та низьколегованих сталей використанням як технологічного середовища водного розчину таніну для зупинки росту втомних тріщин. Метод ґрунтується на концепції штучного створення закриття втомних тріщин, яке досягається заповненням порожнини тріщини твердими продуктами взаємодії таніну із металом берегів тріщини. Тертя берегів під час циклічного навантаження забезпечує постійне оновлення поверхні і відтак, інтенсивну взаємодію та накопичення продуктів у порожнині тріщини. Обґрунтовано високу ефективність такого способу запобігання втомному руйнуванню для сплавів на основі заліза, що дає змогу суттєво підвищити довговічність елементів конструкції за сумісної дії корозивних середовищ та циклічного навантаження.

*Сьомий розділ* зосереджено на методичних особливостях та аналізі результатів досліджень впливу корозійного, водневого та механічного чинників на руйнування вуглецевих і низьколегованих арматурних сталей та адгезивну міцність залізобетону. Випробувано гладку арматуру класу А240С (діаметр 12 мм) та арматурні прутки імпортного виробництва різного діаметра (5... 11 мм), зміцнені семиетапним холодним волочінням. Проаналізовано електрохімічні та корозійно-механічні властивості, а також закономірності руйнування зміцнених прутків перлітної сталі за впливу модельного розчину порової рідини залізобетону залежно від ступеня їх холодного волочіння. Встановлено анізотропію електрохімічних властивостей деформованих прутків, що проявилася у різному стаціонарному потенціалі та поляризаційному опорі бокової і торцевої поверхонь. Виявлено чутливість зміцненої сталі арматурних прутків до водневого розтріскування у модельному розчині порової рідини за потенціалів поляризації – 1,1 В та нижче та малих ( $10^{-6}$ – $10^{-7}$  с<sup>-1</sup>) швидкостей деформування. Розроблено методики оцінювання втрати міцності зчеплення арматури з бетоном внаслідок впливу корозійно-наводнювальних чинників, зокрема, поляризації арматурного прутка в залізобетонному зразку зовнішнім струмом для інтенсифікації електрохімічних процесів, що дало можливість виявити зниження адгезивної міцності арматури з бетоном у середовищі 3% NaCl до 10 разів після тривалої (7 діб) катодної поляризації, що зумовлено, з одного боку, притоком катіонів  $K^+$   $Na^+$  до межі арматура–бетон внаслідок електродифузії, а з іншого – виділення на поверхні арматури водню, який, попри окрихчення сталі, спричиняє також відшарування від неї бетону.

Дисертаційне дослідження завершено загальними висновками, в яких відображені основні результати роботи.

У додатках представлено отримані автором патенти на корисні моделі, акти впровадження та використання результатів досліджень та список опублікованих праць за темою дисертації.

В цілому за змістом та наповненням дисертація є завершеною роботою, яка має наукову та практичну цінність. Її тематика та суть вирішеної наукової проблеми відповідають паспорту спеціальності 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії.

Робота вирізняється високим рівнем авторської оригінальності та повністю відповідає нормам академічної доброчесності.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

До нових наукових результатів, одержаних здобувачем особисто, слід віднести наступне:

Уперше встановлено та електрохімічно обґрунтовано вплив газоподібного водню на корозію та наводнювання трубних сталей, який проявляється зміщенням рівноваги реакції рекомбінації у бік адсорбованого водню і, відповідно, посиленням абсорбування водню металом, що зумовлює зниження корозійної тривкості сталей та зростання їх схильності до водневого розтріскування.

Уперше розкрито воднево-деформаційний механізм розвитку пошкодженості в низькоміцних трубних сталях, що полягає у послабленні воднем адгезії неметалевих включень із матрицею з їх подальшим відшаруванням та полегшеному деформуванню молізованим воднем внутрішніх дефектів. Встановлено стадійність розвитку такої пошкодженості.

Уперше виявлено анізотропію корозійної тривкості зміцнених арматурних прутків (вищий в 1,7 рази поляризаційний опір бокової поверхні порівняно з перерізом у 3% розчині NaCl), яка пов'язана з різним структурно-напруженим станом прутків у поздовжньому і поперечному напрямі, сформованим під час їх зміцнення холодним волочінням.

Уперше встановлено механізм корозійно-механічного руйнування гладких перлітних прутків на різних стадіях семиетапного холодного волочіння за впливу корозивно-наводнювального середовища, який на перших етапах полягає у зародженні тріщини від бокової поверхні під дією водню та її просування вглиб зразка, а після 3-го етапу – одночасному формуванню осередку руйнування у центрі перерізу прутка з подальшим злиттям двох осередків.

Запропоновано новий спосіб застосування таніну, відомого як перетворювач іржі та екоінгібітор, в якості діючої речовини технологічного середовища для зупинки росту втомних тріщин у конструкційних сталях у широкому діапазоні величини циклічного навантаження, який ґрунтується на заповненні порожнини тріщини продуктами взаємодії таніну з металом. Ефективність запропонованого способу зупинки втомних тріщин зумовлена взаємодією таніну зі свіжоутвореною поверхнею тріщини, що виникає внаслідок тертя її берегів під час циклічного навантаження, та накопиченням твердих металохелатних продуктів реакції

у порожнині тріщини, що спричиняє її штучне закриття і припинення подальшого розвитку.

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

### **Практична цінність результатів дисертаційної роботи.**

Практична цінність отриманих в дисертаційній роботі М. І. Греділь результатів полягає у наступному:

Розвинуто метод пришвидшеної деградації сталей, що включає етап попереднього наводнювання як чинника інтенсифікації пошкодженості. Його використано ВП «Галременерго» АТ «ДТЕК Західенерго» для прогнозування поточного технічного стану експлуатованих сталей об'єктів енергетики та обґрунтування можливості їх подальшої експлуатації.

Розроблено методичні основи досліджень впливу газоподібного водню на перебіг електрохімічних процесів на трубних сталях. Підхід передбачає вивчення взаємодії конденсованої вологи з металом внутрішньої поверхні газопроводу в умовах транспортування водню та дає змогу оцінити зміну корозійної тривкості сталі та наводнювання за сумісного впливу газоподібного та електрохімічно генерованого водню.

Розроблено напівнатурну методику оцінювання водневої крихкості трубних сталей, яка передбачає використання спеціального стенду та відтворює сумісний вплив процесів корозії і наводнювання сталей надземних ділянок тонкостінних труб в умовах тривалої експозиції. Освоєння 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.

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».

Запропоновано новий спосіб зупинки росту корозійно-втомних тріщин в конструкційних сталях, який використано у ТОВ «Порттехексперт» для подовження ресурсу конструкційних елементів портових кранів, що експлуатуються в умовах тривалого циклічного навантаження.

Розроблено методику оцінювання адгезивної міцності армованого бетону за впливу корозивно-наводнювальних середовищ, що дало змогу спростити та пришвидшити її визначення у залізобетонних конструкціях.

Для низькоміцних вальцьованих сталей систематизовано комплекс умов випробувань, які підвищують чутливість оцінювання опору їх водневій крихкості. Вони полягають у попередньому електролітичному наводнюванні за обґрунтованим режимом та використанні тонких (1,2 мм) пластинчастих зразків на розтяг, вирізаних у поперечному до вальцювання напрямі.

### **Повнота викладу основних результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях і рефераті**

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 41 наукова праця, серед яких 29 статей у наукових фахових виданнях України та у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 21 та 18 у виданнях, що входять у наукометричні бази даних Scopus та Web of Science, відповідно; 5 – у виданнях, віднесених до Q1 і Q2, 7 – у Q3), 9 у матеріалах і тезах доповідей міжнародних конференцій, 3 патенти на корисну модель.

Матеріали дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на вітчизняних та міжнародних конференціях, в тому числі на XIII, XVI Міжнародних конференціях «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів» (2016, 2022, Львів); II, IV, V, VII Міжнародних науково-технічних конференціях «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (2011, 2015, 2017, 2023, Тернопіль); 22<sup>th</sup> and 24<sup>th</sup> European Conference on Fracture ECF22 and ECF24 (2018, Белград, Сербія; 2024, Загреб, Хорватія); IV та V Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні та експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства і машинобудування» (2013, 2015, Луцьк–Світязь); Міжнародній науково-практичній конференції «Реологічні моделі і процеси деформування структурно-неоднорідних матеріалів» (Луцьк–Світязь, 2016 р.); 1<sup>st</sup> International Workshop on Plasticity, Damage and Fracture of Engineering Materials IWPDF 2019 (2019, Анкара, Туреччина); 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> Mediterranean Conference on Fracture and Structural Integrity (2020, Афіни, Греція; 2022, онлайн); NATO Workshop «Development of novel methods for the prevention of pipeline failures with security implications» (2020, Львів); III Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (2023, онлайн), German-Ukrainian Research Seminar «Hydrogen Influence on Metals» (2025, онлайн) та інших.

### **Мова та стиль дисертації.**



Дисертаційна робота написана державною мовою, поділ на розділи логічний і обґрунтований. Застосована в роботі наукова термінологія є загальнови-знаною, стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття. Результати в роботі достатньо проілюстровані.

**Автореферат відповідає змісту дисертаційної роботи**, написаний грамотно та з використанням сучасної наукової термінології. Оформлення дисертаційної роботи та автореферату відповідає встановленим вимогам.

### **Зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Твердження про конкурентність процесів утворення оксидних і танатних плівок на берегах тріщини варто було б підкріпити відповідними кінетичними/термодинамічними розрахунками.

2. Для підтвердження тези про заповнення танатами заліза порожнини тріщини за впливу технологічного середовища на основі танінів доцільно було провести спектральний фазовий аналіз виявлених відкладів.

3. У розділі 3 застосовано різні режими барботування воднем для двох досліджених трубних сталей (X70 та 17Г1С). Логічніше було б застосувати ті самі режими, щоб порівняти корозійну тривкість цих сталей за однакової інтенсивності впливу водню.

4. Дослідження сумісного впливу газоподібного та електрохімічно генерованого водню на корозію та наводнювання трубних сталей варто було б доповнити вимірюваннями концентрації абсорбованого металом водню та його дифузійних характеристик.

5. Недостатньо обґрунтовано режими катодної та анодної поляризації, які застосовані у розроблених методах дослідження впливу корозивно-наводнювальних середовищ на арматурну сталь у залізобетоні.

6. У тексті дисертації зустрічаються окремі незначні помилки орфографічного характеру та комп'ютерного редагування.

Відмічені недоліки не применшують високої науко-практичної цінності дисертаційної роботи.

### **Загальний висновок.**

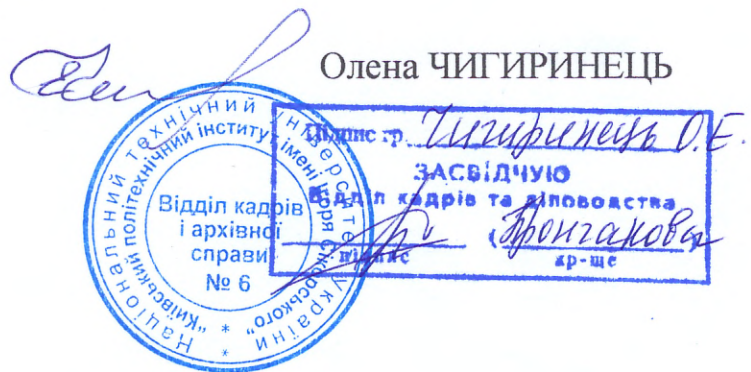
Дисертаційна робота Мирослави Іванівни Греділь «Науково-методологічні засади оцінювання впливу корозійно-водневих чинників на експлуатаційну пошкодженість вуглецевих та низьколегованих сталей», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії, є завершеною кваліфікаційною науковою працею, в якій отримано нові наукові та практичні результати щодо вирішення

важливої науково-технічної проблеми встановлення закономірностей та механізмів корозійно-водневого руйнування вуглецевих та низьколегованих сталей внаслідок експлуатаційної пошкодженості, а також розроблення методів її оцінювання, прогнозування та підвищення опору руйнуванню.

Дисертація М. І. Греділь повністю відповідає паспорту спеціальності 05.17.14 – хімічний опір матеріалів та захист від корозії. Реферат дисертації повною мірою відображає її основні наукові та практичні положення. Дисертаційна робота за своєю актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, результатів та висновків, повнотою викладення, практичною цінністю сприяє вирішенню проблеми підвищення хімічного опору матеріалів та протикорозійного захисту. Робота відповідає вимогам пп. 7, 8 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», 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:

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри фізичної хімії,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
МОН України



Отримано  
01.10.25

Т.І.Л.