

ВІДГУК

офіційного опонента Віри Володимира Володимировича,
кандидата технічних наук, доцента, заступника директора з науково-педагогічної роботи Інституту будівництва, інфраструктури та безпеки життєдіяльності,
доцента кафедри опору матеріалів та будівельної механіки
Національного університету «Львівська політехніка»,
на дисертаційну роботу Сов'як Іванни Миколаївни
«Розрахунково-експериментальна модель прогнозування впливу концентрації водню у металі на довговічність трубопроводів із тріщиноподібними дефектами»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 11 «Математика та статистика»
за спеціальністю 113 «Прикладна математика»

Актуальність теми дисертаційної роботи

Дисертаційне дослідження Сов'як І. М. належить до класу задач прикладної математики, у яких кінцевий прогноз формується на основі послідовного поєднання моделей різної фізичної природи. Для визначення залишкової довговічності трубопроводу з тріщиноподібним дефектом необхідно узгодити результати розрахунку напружено-деформованого стану, моделювання перенесення та пасткування водню, експериментально встановлені характеристики циклічної тріщиностійкості та кінетичне рівняння росту тріщини.

Складність такого завдання полягає в тому, що кожен наступний етап використовує результати попереднього етапу як вихідні дані. Геометрія дефекту і внутрішній тиск визначають локальні поля гідростатичних напружень та пластичних деформацій; ці поля впливають на просторовий розподіл дифузійно-рухомого і пасткованого водню; концентрація водню використовується для визначення параметрів циклічної тріщиностійкості, від яких залежить прогнозована швидкість поширення дефекту. Отже, точність кінцевої оцінки довговічності визначається не лише коректністю окремих моделей, а й способом їх взаємного узгодження.

У відомих дослідженнях достатньо детально опрацьовано окремі складники зазначеної проблеми: скінченно-елементне визначення напружено-деформованого стану конструкцій із тріщинами, моделі дифундування і пасткування водню, експериментальні методи дослідження циклічної тріщиностійкості та кінетичні рівняння росту дефектів. Водночас актуальним

залишається створення розрахункової процедури, яка забезпечувала б послідовний перехід від параметрів навантаження та геометрії трубопроводу до кількісної оцінки числа циклів до досягнення тріщиною критичного розміру.

Актуальність дисертаційної роботи Сов'як І. М. визначається розробленням саме такого розрахунково-експериментального підходу. Його основу становить об'єднання тривимірної скінченно-елементної моделі дефектного трубопроводу, математичної моделі розподілу водню, функціональних залежностей характеристик тріщиностійкості від концентрації водню та алгоритму розрахунку залишкової довговічності. Така постановка відповідає сучасним завданням прикладної математики, пов'язаним із моделюванням складних взаємозалежних процесів і прогнозуванням поведінки відповідальних інженерних конструкцій.

Дисертаційне дослідження виконано відповідно до наукових напрямів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України в межах НД ІІІ-13-21, НД ІІІ-10-24 та договору № 2032 від 15 грудня 2022 року.

Структура, зміст і відповідність дисертації спеціальності

Зміст дисертаційної роботи визначається послідовністю розв'язання поставленого наукового завдання. Авторка переходить від аналізу механічного стану трубопроводу з внутрішнім тріщиноподібним дефектом до моделювання просторового розподілу водню, встановлення залежностей характеристик циклічної тріщиностійкості від його концентрації та розрахунку залишкової довговічності. Завдяки цьому окремі механічні, фізико-хімічні й експериментальні результати об'єднано в єдину розрахункову процедуру.

У першому розділі проаналізовано сучасні підходи до опису впливу водню на властивості трубних сталей, моделювання його перенесення та пасткування, визначення характеристик циклічної тріщиностійкості, а також оцінювання залишкового ресурсу конструкцій із тріщинами. За результатами огляду сформульовано завдання дослідження та обґрунтовано необхідність поєднання механічної, дифузійної й кінетичної складових у межах одного розрахунково-експериментального підходу.

У другому розділі побудовано просторову скінченно-елементну модель фрагмента трубопроводу з внутрішньою півеліптичною тріщиною. Результатом цього етапу є поля гідростатичних напружень та еквівалентної пластичної деформації, які надалі використовуються як вхідні параметри моделі розподілу водню. Отже, скінченно-елементний розрахунок виконує не лише самостійну міцнісну функцію, а й забезпечує зв'язок механічної та дифузійної задач.

Третій розділ містить математичну постановку задачі щодо визначення концентрації водню в околі тріщиноподібного дефекту. Загальну концентрацію представлено сумою дифузійно-рухомої та пасткованої складових. Вплив механічного стану враховано через гідростатичні напруження та залежність густини пасток від еквівалентної пластичної деформації. Виконані обчислення дали змогу дослідити вплив внутрішнього тиску та форми півеліптичної тріщини на просторовий розподіл окремих складових концентрації водню.

У четвертому розділі проаналізовано діаграми циклічної тріщиностійкості сталі 20 за різних концентрацій водню. Встановлено зміну порогового і критичного розмахів коефіцієнта інтенсивності напружень та параметрів рівняння Паріса. Результати фрактографічного аналізу використано для фізичної інтерпретації зміни механізмів руйнування на різних ділянках діаграми росту втомної тріщини.

У п'ятому розділі результати попередніх етапів об'єднано в розрахунковій моделі залишкової довговічності. Дискретні значення характеристик циклічної тріщиностійкості апроксимовано функціями концентрації водню, після чого їх уведено в рівняння росту тріщини. Проведений параметричний аналіз дав змогу оцінити вплив тиску, концентрації водню та геометрії дефекту на кількість циклів до досягнення тріщиною критичного розміру.

Застосування методів математичного моделювання, методу скінченних елементів, регресійного аналізу та числового інтегрування, а також побудова системи взаємопов'язаних розрахункових моделей відповідають предметній області спеціальності 113 «Прикладна математика». Дисертація демонструє практичне застосування математичних методів для розв'язання комплексного завдання прогнозування поведінки інженерної конструкції.

Рукопис містить вступ, 5 розділів, загальні висновки, список використаних джерел і 3 додатки. Загальний обсяг роботи становить 161 сторінку; основний текст – 119 сторінок. Матеріал ілюстровано 33 рисунками та 6 таблицями; список використаних джерел налічує 135 найменувань. Структура дисертації є логічною, а послідовність викладу матеріалу відповідає поставленій меті та сформульованим завданням.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи Сов'як І. М. полягає у розвитку математичних методів прогнозування залишкової довговічності трубопроводів із внутрішніми тріщиноподібними дефектами за умов наводнювання металу.

Запропоновано розрахунково-експериментальний підхід, у якому узгоджено механічну, дифузійну та кінетичну складові досліджуваного процесу.

Розвинуто математичну модель розподілу водню в околі внутрішньої півеліптичної тріщини з урахуванням просторової неоднорідності гідростатичних напружень, пластичних деформацій, а також дифузійно-рухомої та пасткової складових концентрації. Це дало змогу оцінити вплив внутрішнього тиску та форми дефекту на локальне наводнювання металу.

За результатами опрацювання експериментальних даних побудовано залежності порогового і критичного розмахів коефіцієнта інтенсивності напружень, а також параметрів і рівняння Паріса від концентрації водню. Їх використання у моделі росту тріщини забезпечило врахування впливу наводнювання під час визначення кількості циклів до досягнення дефектом критичного розміру.

Встановлено кількісні закономірності спільного впливу внутрішнього тиску, геометрії тріщини та концентрації водню на залишкову довговічність трубопроводу. Отже, наукова новизна роботи визначається створенням узгодженої розрахункової процедури, яка забезпечує перехід від параметрів трубопроводу та дефекту до прогнозу його залишкової довговічності з урахуванням концентрації водню в металі.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень

Обґрунтованість наукових положень дисертації забезпечується послідовною постановкою та розв'язанням взаємопов'язаних задач. Результати скінченно-елементного аналізу напружено-деформованого стану використано як вихідні дані для визначення розподілу водню, а залежні від його концентрації характеристики циклічної тріщиностійкості введено в модель росту тріщини. Така побудова забезпечує логічну узгодженість окремих складових запропонованого підходу.

Отримані розрахункові закономірності відповідають фізично обґрунтованим тенденціям: зі збільшенням внутрішнього тиску зростають локальні напруження, пластичні деформації та концентрація водню поблизу дефекту, а погіршення характеристик тріщиностійкості спричиняє зменшення прогнозованої довговічності трубопроводу.

Достовірність функціональних залежностей параметрів циклічної тріщиностійкості від концентрації водню підтверджується їх узгодженням з експериментальними даними. Для отриманих апроксимацій наведено коефіцієнти детермінації $R^2 > 0,97$, а середньоквадратичне відхилення не

перевищує 5%. Загальні висновки відповідають поставленим завданням і результатам, представленим у розділах дисертації.

Разом із тим, кількісні прогнози є обґрунтованими в межах прийнятих характеристик сталі 20, досліджених діапазонів концентрації водню, внутрішнього тиску та геометрії тріщиноподібного дефекту. Зазначені обмеження не заперечують достовірності встановлених закономірностей, але їх слід враховувати під час практичного застосування моделі.

Практичне значення результатів

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у можливості реалізації запропонованого підходу у вигляді послідовного розрахункового алгоритму. За заданими характеристиками трубопроводу, внутрішнього тиску, геометрії тріщиноподібного дефекту та концентрації водню модель дає змогу визначати параметри росту тріщини і прогнозовану кількість циклів до досягнення нею критичного розміру.

Розроблені залежності можуть бути використані для проведення параметричних розрахунків, порівняння різних умов навантаження та визначення поєднань вихідних параметрів, що найбільше впливають на довговічність трубопровідного елемента. Запропонована процедура також створює основу для подальшого програмного впровадження та розширення моделі на інші матеріали й геометричні конфігурації після визначення відповідних характеристик матеріалу.

Прикладне спрямування роботи підтверджується використанням одержаних результатів у ТОВ НВП з іноземними інвестиціями «УКРТРУБОІЗОЛ» під час виконання прогнозних розрахунків для трубопроводів і формування технічних вимог до труб великого діаметра.

Повнота опублікування результатів та особистий внесок

Основні результати дисертаційного дослідження відображено у наукових публікаціях здобувачки. Опубліковані праці охоплюють математичне моделювання розподілу водню поблизу тріщиноподібного дефекту, оцінювання залишкової довговічності трубопроводу, аналіз впливу концентрації водню та геометрії тріщини, а також застосування відповідних підходів до елементів конструкцій, що працюють у водневовмісних середовищах.

За темою дисертації наведено 7 наукових праць, серед яких 4 статті у виданнях, індексованих у міжнародних наукометричних базах Scopus та/або Web of Science, і 3 публікації в матеріалах міжнародних конференцій. Зміст цих

праць відображає основні етапи побудови запропонованого розрахунково-експериментального підходу та результати параметричних досліджень.

Особистий внесок Сов'як І. М. полягає у формуванні розрахункових схем, виконанні математичного і скінченно-елементного моделювання, опрацюванні експериментальних даних, побудові залежностей характеристик циклічної тріщиностійкості від концентрації водню та аналізі впливу вихідних параметрів на прогнозовану довговічність трубопроводу. У працях, виконаних у співавторстві, внесок здобувачки конкретизовано, і він відповідає результатам, винесеним на захист.

Дотримання принципів академічної доброчесності

Аналіз тексту дисертації засвідчує, що авторка послідовно розмежовує запозичені положення й результати, отримані самостійно: під час викладення теоретичних засад, математичних моделей та експериментальних даних наведено посилання на відповідні джерела, а власний внесок здобувачки чітко відділено від використаних методів і залежностей.

Особистий внесок Сов'як І. М. у наукових працях, підготовлених у співавторстві, конкретизовано окремо для кожної публікації.

Перевірку тексту дисертації здійснено системою StrikePlagiarism.com (звіт від 16.07.2026, ідентифікатор документа 334499255); встановлений коефіцієнт подібності становить 5,6%, коефіцієнт цитування – 0,32%, що відповідає нормі оригінальності наукового тексту.

За сукупністю результатів текстологічного аналізу дисертації, перевірки коректності співавторства та даних автоматизованої перевірки на плагіат підстав для висновку про порушення здобувачкою принципів академічної доброчесності не виявлено.

Зауваження та дискусійні положення

1. У математичній моделі перенесення водню механічну і дифузійну задачі розв'язано послідовно: поля НДС передаються до задачі дифузії, але зворотний вплив водню на деформаційні характеристики сталі не враховується. Доцільно було прямо визначити таку схему як одnobічно зв'язану та оцінити область її придатності порівняно з повністю зв'язаною постановкою.
2. Опис скінченно-елементної реалізації потребує кількіснішого обґрунтування збіжності. Варто було навести кількість елементів і мінімальний розмір елемента біля фронту тріщини, типи скінченних елементів, критерії незалежності результату від сітки та похибку порівняння КІН або напружень із відомим аналітичним розв'язком.

3. У моделі довговічності характеристики тріщиностійкості задаються як функції певної концентрації C_H , тоді як дифузійна задача дає просторово неоднорідні поля дифузійно-рухомого, пасткованого і сумарного водню. Потрібно чіткіше визначити правило переходу від цього поля до одного значення C_H у рівнянні росту тріщини: максимуму, локального значення на фронті, середнього в процесній зоні чи іншої величини.

4. Апроксимація $n(C_H)=4,39+0,59 \times \ln(C_H)$ математично не визначена при $C_H=0$, хоча вихідні дані містять ненаводнений стан. Крім того, логарифмування розмірної величини потребує нормування. Доцільно записати залежність через безрозмірне відношення C_H/C_0 , чітко встановити нижню межу області визначення та окремо задати значення для ненаводненого металу.

5. У дисертації доцільно було оцінити чутливість прогнозованої залишкової довговічності до зміни вихідних параметрів моделі та похибок їх визначення. Це дало б змогу встановити параметри, які найбільше впливають на розраховану кількість циклів, і визначити межі достовірності отриманого прогнозу.

Зазначені положення не ставлять під сумнів основні результати дисертації, мають уточнювальний і рекомендаційний характер та можуть бути враховані у подальшому розвитку запропонованого підходу.

Загальний висновок

У дисертаційній роботі Сов'як Іванни Миколаївни розроблено розрахунково-експериментальний підхід до оцінювання залишкової довговічності трубопроводів із внутрішніми тріщиноподібними дефектами з урахуванням концентрації водню в металі. Поєднання моделювання напружено-деформованого стану, дифундування і пасткування водню, залежних від його концентрації характеристик циклічної тріщиностійкості та розрахунку росту тріщини забезпечило досягнення поставленої мети й отримання нових наукових результатів.

Представлене дослідження має належний рівень наукової новизни, теоретичної обґрунтованості та практичного значення. Основні положення дисертації висвітлено у наукових публікаціях здобувачки. Сов'як І. М. продемонструвала здатність формулювати та розв'язувати комплексні задачі прикладної математики, обґрунтовано застосовувати математичні й розрахункові методи, аналізувати отримані результати та формулювати відповідні висновки. Висловлені у відгуку зауваження мають уточнювальний характер і не змінюють загальної позитивної оцінки роботи.

За змістом, науковим рівнем, новизною та обґрунтованістю одержаних результатів, їх практичною спрямованістю, повнотою опублікування і

дотриманням принципів академічної доброчесності дисертаційна робота відповідає спеціальності 113 «Прикладна математика» та вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами. На підставі викладеного вважаю, що Сов'як Іванна Миколаївна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 11 «Математика та статистика» за спеціальністю 113 «Прикладна математика».

Офіційний опонент

заступник директора з науково-педагогічної роботи
Інституту будівництва, інфраструктури та безпеки життєдіяльності,
доцент кафедри опору матеріалів та будівельної механіки
Національного університету «Львівська політехніка»,
кандидат технічних наук, доцент

Володимир ВІРА

«10» серпня 2026 р.

Проректор



Ірина ЯРЕМЧУК