

РЕЦЕНЗІЯ

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

Теоретичне прогнозування довговічності конструкцій за сумісної дії механічного навантаження і водню потребує узгодженого опису процесів, що відбуваються на різних масштабних рівнях. Геометрія тріщиноподібного дефекту визначає локальний напружено-деформований стан; градієнти гідростатичних напружень впливають на перенесення водню; пластична деформація змінює густину пасток; накопичення водню позначається на опорі матеріалу поширенню тріщини. Побудова моделі, яка пов'язує ці явища з кінетикою дефекту, є складним і актуальним завданням механіки руйнування та прикладної математики.

У дисертації Сов'як І. М. розглянуто внутрішню півеліптичну тріщину в елементі трубопроводу. Запропонована розрахункова схема передбачає визначення механічних полів, оцінювання дифузійно-рухомої і пасткової складових концентрації водню, встановлення залежних від наводнювання характеристик циклічної тріщиностійкості та інтегрування рівняння росту тріщини. Така постановка спрямована на перехід від якісного опису впливу водню до кількісного прогнозування залишкової довговічності.

Актуальність дослідження посилюється необхідністю обґрунтування працездатності трубопровідної інфраструктури за зміни складу транспортованого середовища та тривалої циклічної експлуатації. Тема роботи є своєчасною і відповідає сучасним напрямкам теоретичних та прикладних досліджень руйнування матеріалів у водневовмісних середовищах.

Роботу виконано відповідно до наукових напрямів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України в межах НД III-13-21 (№ 0121U108959), НД III-10-24 (№ 0124U000049) і договору № 2032 від 15 грудня 2022 року.

Структура і зміст дисертації

Логіку роботи визначає послідовний перехід від механічної постановки до моделі перенесення водню та прогнозування росту тріщини. У першому розділі узагальнено сучасні уявлення про дію водню на трубні сталі, механізми його дифундування і пасткування, характеристики циклічної тріщиностійкості та методи оцінювання ресурсу дефектних елементів.

У другому розділі сформовано тривимірну скінченно-елементну модель фрагмента труби з внутрішньою півеліптичною тріщиною у пружно-пластичній постановці. Визначено розподіли гідростатичних напружень та еквівалентної пластичної деформації залежно від внутрішнього тиску і співвідношення півосей дефекту. Ці поля використано як механічну основу моделі перенесення водню.

Третій розділ містить теоретичне обґрунтування потоку водню через градієнт хімічного потенціалу, формулювання початкових і крайових умов та модель розподілу дифузійно-рухомого, пасткованого і загального водню. Пасткування описано через локальну рівновагу Оріані, а густину пасток пов'язано з пластичною деформацією. Розділ є центральним для теоретичної частини дисертації, оскільки забезпечує перехід від напружено-деформованого стану до концентрації водню.

У четвертому розділі систематизовано характеристики циклічної тріщиностійкості сталі 20 за різної концентрації водню та розглянуто зміни мікромеханізмів руйнування. У п'ятому розділі дискретні характеристики матеріалу апроксимовано функціями концентрації водню й уведено до моделі росту втомної тріщини. Виконано параметричні розрахунки впливу тиску, форми дефекту та наводнювання на кількість циклів до критичного стану.

Загальний обсяг дисертації становить 161 сторінку, основний текст — 119 сторінок. Рукопис містить вступ, п'ять розділів, загальні висновки, список зі 135 джерел і три додатки; ілюстрований 33 рисунками та 6 таблицями. Структура відповідає меті й завданням дослідження, а використані математичні та розрахункові методи відповідають спеціальності 113 «Прикладна математика».

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дисертації полягає у розвитку теоретико-розрахункового опису довговічності трубопроводу з внутрішньою півеліптичною тріщиною за наводнювання металу. Сформовано послідовну модель, у якій локальний механічний стан визначає умови перерозподілу водню, а концентрація водню використовується для задання характеристик росту втомної тріщини.

Запропоновано математичну модель просторового розподілу водню з поділом на дифузійно-рухому і пастковану складові. Урахування градієнта гідростатичних напружень, залежної від пластичної деформації густини пасток та рівноваги Оріані дало змогу встановити закономірності локалізації водню біля дефекту за різних тисків і геометричних співвідношень тріщини.

Отримано аналітичні залежності порогового і критичного розмахів КІН та параметрів рівняння Паріса від концентрації водню. Їх введення до кінетичної моделі забезпечило кількісне оцінювання спільного впливу внутрішнього тиску, геометрії дефекту і наводнювання на залишкову довговічність трубопроводу.

Теоретичне і практичне значення результатів

Теоретичне значення роботи визначається розвитком взаємопов'язаного опису механічного стану, дифузії і пасткування водню та докритичного росту тріщини. Представлена схема може бути основою для подальшого врахування нестационарних режимів навантаження, еволюції геометрії дефекту і двобічного зв'язку між наводнюванням та властивостями матеріалу.

Практичне значення полягає у можливості визначення прогнозованої кількості циклів для заданих параметрів трубопроводу, тиску, форми дефекту і

концентрації водню. Отримані залежності придатні для порівняльного аналізу експлуатаційних сценаріїв у межах досліджених умов. Застосування результатів у ТОВ НВП з іноземними інвестиціями «УКРТРУБОІЗОЛ» підтверджує прикладне спрямування дослідження.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень

Обґрунтованість положень забезпечується використанням законів балансу, термодинамічного подання потоку через градієнт хімічного потенціалу, положень механіки деформівного твердого тіла і механіки руйнування. Окремі складники моделі мають чіткий фізичний зміст, а переходи між ними узгоджені через поля гідростатичних напружень, пластичної деформації та концентрації водню.

Встановлені тенденції відповідають фізичним уявленням про механічно стимульоване накопичення водню і зниження циклічної тріщиностійкості. Апроксимації характеристик матеріалу характеризуються коефіцієнтами детермінації понад 0,97 та наведеним середньоквадратичним відхиленням до 5 %. Висновки дисертації випливають із результатів основних розділів і відповідають поставленим завданням.

Кількісні оцінки слід застосовувати в межах прийнятих властивостей сталі 20, діапазонів тиску, концентрації водню та геометричних параметрів дефекту. Це визначає межі інтерпретації результатів, але не заперечує встановлених закономірностей.

Публікації та особистий внесок здобувачки

За темою дисертації наведено сім наукових праць: чотири статті у виданнях, що індексуються у Scopus та/або Web of Science, і три публікації у матеріалах міжнародних конференцій. Публікації відображають моделювання концентрації водню, аналіз залишкової довговічності та вплив геометрії дефекту й наводнювання на ресурс.

Особистий внесок Сов'як І. М. охоплює формування розрахункових схем, виконання математичного і скінченно-елементного моделювання, опрацювання експериментальних характеристик, побудову функціональних залежностей і

параметричний аналіз довговічності. У спільних публікаціях внесок здобувачки конкретизовано.

Рівень виконання наукового завдання та академічна доброчесність

Поставлене наукове завдання загалом виконано, а мету дослідження досягнуто. Здобувачка продемонструвала володіння методами математичного моделювання, теорії перенесення, скінченно-елементного аналізу, механіки руйнування, регресійного опрацювання та числового інтегрування.

Теоретичні положення, залучені моделі та експериментальні дані супроводжуються посиланнями на джерела. Результати здобувачки відокремлено від відомих положень, а для праць у співавторстві зазначено її особистий внесок. За матеріалами дисертації підстав для висновку про порушення принципів академічної доброчесності не виявлено.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. Пасткування водню описано на основі припущення про локальну термодинамічну рівновагу Орбані між дифузійно-рухомим і пасткованим воднем. Доцільно було конкретизувати часові та температурні умови, за яких швидкість обміну водню з пастками дає підстави застосовувати це припущення для дослідженої сталі.
2. У розділі 3 розглянуто нестационарне дифундування водню, тоді як у моделі довговічності використано циклічне навантаження. Варто було зіставити характерний час перерозподілу водню з періодом циклу та пояснити, чи вважається поле концентрації сталим протягом циклу, квазістационарним або таким, що змінюється разом із навантаженням.
3. У моделі пасткований водень описано за допомогою однієї ефективної густини пасток і однієї константи рівноваги. Водночас у феритно-перлітній сталі водень може взаємодіяти з пастками різної природи та з різними енергіями зв'язку. Доцільно було обґрунтувати можливість їх подання однією еквівалентною групою та визначити межі застосування такого наближення.

4. У числовій задачі на поверхні контакту з водневовмісним середовищем задається концентрація або потік водню. Для повнішого теоретичного обґрунтування моделі варто було конкретизувати, яку граничну умову використано в остаточних розрахунках, та пояснити перехід від тиску газоподібного водню до поверхневої концентрації з урахуванням розчинності й поверхневого масообміну.

5. Розрахунки виконано за сталої температури, тоді як коефіцієнт дифузії та константа пасткування мають виражену температурну залежність. Доцільно було чітко навести температуру, для якої прийнято параметри моделі, і окреслити можливість застосування отриманих залежностей за інших температурних режимів експлуатації.

Наведені зауваження мають уточнювальний і рекомендаційний характер, окреслюють можливості подальшого розвитку теоретичної моделі та не знижують наукової цінності отриманих результатів.

Загальний висновок

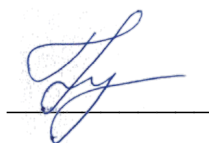
Дисертація Сов'як Іванни Миколаївни є завершеною науковою працею, у якій розроблено взаємопов'язаний розрахунково-експериментальний підхід до прогнозування залишкової довговічності трубопроводу з внутрішньою півеліптичною тріщиною за дії водню. Поєднання моделі напружено-деформованого стану, теоретичного опису дифундування і пасткування водню, залежних від концентрації характеристик циклічної тріщиностійкості та кінетичного рівняння росту тріщини забезпечило одержання нових науково обґрунтованих результатів.

Робота відповідає заявленій темі та спеціальності, має належний рівень наукової новизни, теоретичної обґрунтованості й практичного значення. Основні результати висвітлено в наукових публікаціях. Сов'як І. М. продемонструвала здатність самостійно формулювати та розв'язувати комплексні задачі прикладної математики й володіння методологією наукової діяльності.

За актуальністю, змістом, науковим рівнем, новизною та обґрунтованістю результатів, повнотою їх опублікування і дотриманням принципів академічної доброчесності дисертаційна робота відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 зі змінами. Сов'як Іванна Миколаївна заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 11 «Математика та статистика» за спеціальністю 113 «Прикладна математика».

Рецензент

старший науковий співробітник
відділу теоретичних основ механіки
руйнування
Фізико-механічного інституту
ім. Г. В. Карпенка НАН України,
кандидат технічних наук



Наталія ІВАНТИШИН

Підпис Наталії ІВАНТИШИН засвідчую:

Учений секретар
Фізико-механічного інституту
ім. Г. В. Карпенка НАН України,
к.т.н., ст.н.с.



Валентина КОРНІЙ