

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

ПОТОПАЛЬСЬКА КСЕНІЯ ЄВГЕНІВНА



УДК 539.43:621.64

**ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З
ЛОКАЛЬНИМИ КОРОЗІЙНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ НА ОСНОВІ
СТАТИСТИЧНОЇ ОЦІНКИ СТАТИЧНОЇ ТА ЦИКЛІЧНОЇ МІЦНОСТІ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, доцент
Ларін Олексій Олександрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
директор навчально-наукового інженерно-
фізичного інституту.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Зіньковський Анатолій Павлович,
Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка
НАН України, заступник директора інституту з
наукової роботи, завідувач відділом коливань та
вібраційної надійності;

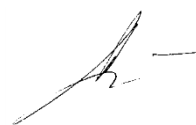
кандидат технічних наук, доцент
Алфьоров Олексій Ігорович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства ім. Петра Василенка,
проректор з науково-педагогічної роботи.

Захист відбудеться 12 грудня 2019 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, а також на сайті <http://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/vrada/>

Автореферат розісланий 11 листопада 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



М.А. Ткачук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В основі енергоефективності та енергетичної безпеки України знаходяться питання, які пов'язані із транспортуванням енергоносіїв. Машинобудівні конструкції, що застосовуються в енергетиці, працюють в умовах інтенсивних циклічних навантажень та дії агресивних зовнішніх або робочих середовищ. Тривала експлуатація конструкцій у таких умовах призводить до корозійного зношення або формування об'ємних дефектів на робочих поверхнях, стоншення стінок корпусних деталей тощо. Це призводить до появи зон додаткової набутої локалізації напружено-деформованого стану (НДС) у елементах конструкцій, що здатні суттєво відрізнитись від проектних значень, та разом із циклічним характером навантаження призводить до інтенсивного накопичення втоми матеріалу і викликає відмову. Несвоєчасне їх виявлення може стати причиною виникнення аварійних ситуацій, екологічних катастроф, завдати суттєвих споживчих збитків. Прогнозування показників надійності елементів таких конструкцій є актуальною проблемою, вирішення якої дає можливість попередити їх раптові відмови, спланувати ремонтні роботи, оцінити експлуатаційні ризики тощо.

Таким чином, актуальною науково-практичною задачею є розвиток методів та підходів аналізу залишкової міцності та надійності конструкцій, які використовуються у транспортуванні енергоносіїв та енергетичному машинобудуванні з корозійно пошкодженими ділянками, які дають можливість спрогнозувати можливий розвиток корозійних пошкоджень процесу накопичення втоми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі динаміки та міцності машин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») за планами науково-дослідних робіт відповідно до завдань Міжнародного науково-дослідного проекту «Innovative Non-Destructive Testing and Advanced Composite Repair of Pipelines with Volumetric Surface Defects (INNOPIPES)», що виконувався у 2012-2016 рр. в рамках 7-ї Рамкової програми ЄС, Дії Марії Кюрі (Contr. № PIRSES-GA-2012-318874); держбюджетної НДР МОН України «Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій» (ДР № 0117U004969), в яких здобувач була виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка розрахункових підходів до прогнозування надійності та оцінки залишкового ресурсу елементів конструкцій, що використовуються в транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні, та які мають набуті пошкодження корозійної природи, на основі статистичної оцінки концентрації напружено-деформованого стану і процесів накопичення втоми.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні завдання:

– проаналізувати відомі в літературі та практичні дані щодо особливостей формування та закономірностей розвитку експлуатаційних

пошкоджень (корозійної та втомної природи) в елементах конструкцій, які використовуються в транспортуванні енергоносіїв та енергетичному машинобудуванні, а також існуючі методи оцінки міцності, прогнозування довговічності та визначення ресурсу цих конструкцій;

- розробити удосконалені підходи оцінки надійності та прогнозу залишкового ресурсу на основі теоретичної оцінки процесів накопичення втоми в пошкоджених ділянках елементів конструкцій, що визначатиметься статистичною оцінкою можливого розвитку корозійного дефекту;

- розробити параметричні математичні моделі визначення НДС елементів конструкції, які мають складну тривимірну криволінійну геометрію та об’ємні пошкодження корозійної природи;

- на основі створених моделей здійснити дослідження можливих рівнів концентрації напружень у пошкоджених ділянках конструкцій з урахуванням експлуатаційної варіації навантаження та прогнозу стохастичного характеру розвитку пошкодження корозійної природи, а також дослідження процесів накопичення втоми в цих елементах;

- здійснити комплекс практичних розрахункових досліджень спрямованих на оцінку надійності елементів конструкцій, які використовуються в транспортуванні енергоносіїв та енергетичному машинобудуванні та на основі проведених досліджень розробити рекомендації щодо можливого подовження строку їхньої роботи та можливості відновлення працездатності.

Об’єктом дослідження є процеси накопичення нелокалізованої втомної пошкоджуваності, а також вплив наявності та розвитку у часі локалізованих корозійних дефектів на міцність та надійність елементів конструкцій, які використовуються при транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні.

Предмет дослідження – показники надійності, а також імовірнісні характеристики параметрів НДС та втомної пошкоджуваності, які накопичуються в елементах конструкцій, що досліджуються, з урахуванням наявності та прогнозу стохастичного розвитку корозійних дефектів у них.

Методи дослідження. Основні теоретичні положення дисертаційної роботи базуються на фундаментальних підходах теорій пружності, пластичності, надійності та випадкових процесів. Оцінка характеристик НДС пошкоджених елементів конструкцій здійснювалась у рамках сучасних засобів комп’ютерного моделювання з використанням методу скінчених елементів (МСЕ), корозійні пошкодження в них моделювались явно як об’ємні дефекти у тривимірній постановці. Геометричні характеристики цих дефектів визначались шляхом розв’язання стохастичних диференціальних рівнянь кінетики росту корозії. Визначення ймовірнісних показників варіації НДС конструкцій, проводилось на основі статистичних симуляцій. Дослідження процесу накопичення втоми в матеріалах конструкцій здійснювалось на основі нелінійних моделей у рамках концепції континуальної механіки пошкоджуваності.

Наукова новизна отриманих результатів:

– Отримані нові закономірності щодо впливу об'ємних дефектів корозійної природи на концентрацію напружень у елементах конструкцій, які використовуються при транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні за різних параметрів цих дефектів на криволінійних ділянках конструкцій, що дало можливість оцінити їхній вплив на НДС елементів конструкцій.

– Вперше отримані статистичні оцінки щодо можливої варіації концентрації напружень в елементах конструкцій, які використовуються при транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні, в умовах прогнозу можливого стохастичного розвитку корозії у часі та з урахуванням експлуатаційної варіації циклічного навантаження.

– Знайшли подальший розвиток статистичні моделі та методи оцінки процесу розвитку пошкоджуваності при багато- та малоцикловій втомі, що на відміну від існуючих моделей враховують випадкову зміну параметрів НДС в часі, яка викликана формуванням концентрації напружень навколо об'ємних поверхневих дефектів, що дало можливість визначити параметр пошкоджуваності.

– Вперше встановлено закономірності впливу наявності корозійних дефектів різного ступеня розвитку на прогноз надійності залишкового ресурсу елементів конструкцій на основі удосконалених статистичних моделей оцінки процесу накопичення втомних пошкоджень, що дало можливість отримати параметри надійності конструкцій.

Практичне значення отриманих результатів для машинобудування складають підходи до побудови моделей елементів конструкцій із корозійними дефектами та методики оцінки їх експлуатаційної надійності. Створені розрахункові моделі та визначені основні закономірності формування НДС в умовах експлуатації пошкоджених ділянок криволінійних частин трубопроводів, які є типовими елементами конструкцій, що використовуються для транспортування енергоносіїв дають можливість для подальшого діагностування технічного стану таких конструкцій та своєчасне планування ремонтних робіт. Окрему корисно-практичну цінність мають розроблені скриптові програми, які дають можливість автоматично отримувати оцінки параметрів НДС на основі запропонованих теоретичних положень для здійснення оцінки залишкового ресурсу пошкоджених конструкцій. Розроблено рекомендації щодо раціонального вибору параметрів ремонтних накладок.

Результати, отримані в дисертації, впроваджені відповідно до результатів виконання дослідницького гранту «INNOPIPES», реалізація якого відбувалась в рамках 7-ої рамкової програми ЄС, Дії Марії Кюрі. Окрім цього розроблені методики впроваджені у практику проектно-дослідних робіт інженерно-технічного центру «КОРО», (м. Харків), а також у навчальний процес НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Усі положення та результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто [1-15]. Публікації

[1, 10, 11] написані одноосібно. В роботах, що виконані у співавторстві здобувачу належить: розроблено параметричні моделі конструкцій з дефектом зі заданими розмірами в його стінці та здійснено розрахунки його залишкової міцності [3, 6,8]. Здійснено серію розрахунків для визначення параметрів статистичного НДС конструкції з дефектом, розміри якого задаються у ймовірнісній постановці [2,5,12]. Розроблено здобувачем математичну модель для визначення накопичення втомних пошкоджень у конструкції з корозійним дефектом та визначено залишковий ресурс конструкції при середніх розмірах дефекту [4,13]. Наведено статистичний прогноз щодо можливих розмірів дефекту та ймовірнісний аналіз залишкового ресурсу за цього прогнозу [4,14,15]. Визначено параметри надійності для конструкції при урахуванні процесів накопичення втомних пошкоджень у матеріалі та дефекту [4,7]. Здобувачем розроблені рекомендації, щодо раціонального вибору розмірів ремонтних накладок для подальшого використання конструкцій з поверхневими дефектами [9].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались на Міжнародних науково-практичних конференціях: Конференції магістрантів та аспірантів НТУ «ХП» (м. Харків, 2014-2015 рр., 2017-2018 рр.), «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD) (м. Харків, 2014-2018 рр.), «Безразрушительн контрол в съвременната индустрия» (м. Софія, Республіка Болгарія 2015 р.), «Сучасні проблеми машинобудування» (Харків, 2016 р.), «Сучасні проблеми механіки та математики» (Львів, 2018 р.), «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Одеса, 2018 р.). Окремі розділи роботи були представлені на науковому семінарі в інституті механіки Магдебурзького університету (м. Магдебург, Німеччина), (2017 р.) У повному обсязі дисертаційна робота була представлена на розширеному науковому семінарі кафедри динаміки та міцності машин НТУ «ХП» із запрошенням фахівців інших профільних кафедр та наукових установ (2019 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 15 наукових публікаціях, з них: 9 статей (5 - у наукових фахових виданнях України, одна з яких включена у наукометричну базу Scopus; 4 - у періодичних закордонних виданнях, дві з яких включені до наукометричної бази Scopus), 6 - у матеріалах та тезах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 156 сторінок, з них основного тексту 124 сторінок; 74 рисунки по тексту; 1 рисунок на 1 окремій сторінці; 19 таблиць по тексту; списку використаних джерел з 167 найменувань на 17 сторінках; 3 додатків на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну

та практичну значущість роботи.

Перший розділ присвячено аналізу науково-технічної літератури щодо дослідження корозійно пошкоджених елементів конструкцій, які використовуються в транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні.

Виділено основні методи для визначення залишкового ресурсу конструкцій, які використовуються в транспортуванні енергоносіїв та енергетичному машинобудуванні та мають набуті в експлуатації дефекти: Бескровна Ж.Ю., Водка О.О., Логинов А.Н., Пічугін С.Ф., Семко О.В., Побережний Л.Я., Bahaari M.R., Bazán F.A.V., Beck A.T., Caleyó F., Chen Y., Cunha D.J.S, Dann M.R., De Leon D., Fekete G., Jeong J., Motta R.S., Netto T.A., Seo J.K., Silva R.C.C, Valor A., Witek M.

У розділі також представлено аналіз робіт, які спрямовані на прогнозування надійності елементів конструкцій у машинобудуванні. Окремо відмічено дослідження Аніловича В.Я., Болотіна В.В., Грінченко О.С., Гусєва А.С., Жовдака В.О., Светлицький В.О., Переверзєв Є.С., Bazán F.A.V., Beck A.T., Bisaggio H., Cheng Y.F., Mishra M., Netto T.A, Teixeira A.P., Valor A.

З огляду літературних джерел встановлено, що в більшості робіт оцінку залишкової міцності здійснюють на схематизованих дефектах та прямолінійних фрагментах конструкцій; обмежуються оцінкою статичної міцності у детермінованій постановці, а для оцінки надійності не враховують явно вплив дефектів на концентрацію НДС, а також процеси накопичення втоми.

Проаналізовано підходи до оцінки накопичення втоми пошкоджуваності, яким приділено багато уваги вітчизняними та закордонними вченими Бобирем М.І., Бреславським Д.В., Зіньковським А.П., Качановим Л.М., Львовим Г.І., Марущаком П.О., Морачковським О.К., Работновим Ю.М., Трощенко В.Т., Яснієм О.П., Chaboche J.L., Cunha D.J.S., Desmorat R., Fatoba O., Lemaitre J., Manson S.S., Mansor N.I.I., Murakami S., Papadopoulos G.A., Pinheiro V., Takahashi K., Tan J. Визначено, що сучасні підходи до моделювання нелокалізованої втоми ґрунтуються на теорії континуальної механіки пошкоджуваності.

Таким чином, визначено актуальний напрям досліджень, що пов'язаний із вирішенням науково-практичної задачі щодо розвитку методів та підходів до аналізу міцності та прогнозу надійності конструкцій, які використовуються в енергетичному машинобудуванні та мають набуті пошкодження корозійної природи на основі статистичної оцінки концентрації НДС і процесів накопичення втоми з метою визначення залишкового ресурсу для подальшого планування ремонтних робіт.

У **другому розділі** представлено теоретичні основи розв'язання задачі статистичної оцінки елементів конструкцій із пошкодженнями, зокрема, оцінки для прогнозованих габаритних розмірів дефектів за статистичного моделювання. Розв'язання цієї задачі схематично зображено на рис. 1. Відповідно до схеми методологія дослідження складається із чотирьох етапів. На першому створюється параметрична скінчено-елементна (СЕ) модель

пошкодженого елемента конструкції, що дає можливість виконувати автоматизовані розрахунки НДС елемента конструкції з дефектами заданих розмірів у широкому діапазоні значень цих параметрів.

На другому етапі створюється алгоритм генерації ансамблю СЕ моделей конструкцій із дефектами певної категорії розвитку, що генеруються на основі статистичних даних. Далі здійснюються розрахунки НДС для всього ансамблю моделей навантаження. Такий комплекс розрахунків дає можливість здійснювати ймовірнісне моделювання щодо прогнозу процесу накопичення пошкоджуваності втомю, в околі дефекту, що і складає 3 етап. На заключному етапі на основі статистичних даних із накопичення втомю здійснюється прогноз надійності.

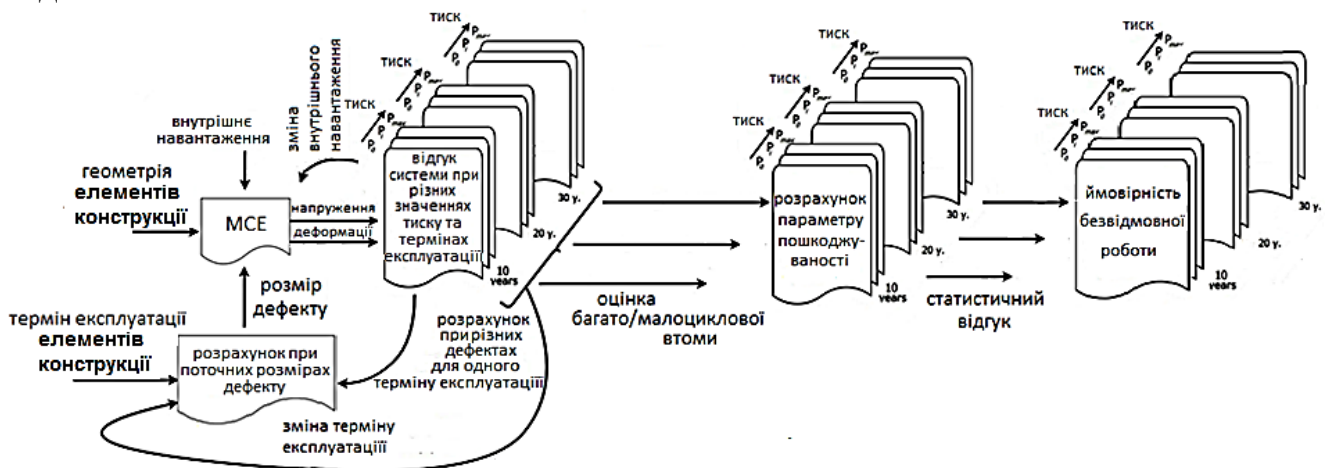


Рисунок 1 – Схематичне зображення розв'язання поставленої задачі

У розділі представлено розв'язання даної задачі генерації ансамбля моделей із прогнозування можливих розмірів дефекту для його фіксованого рівня розвитку на основі статистичного моделювання з відомими з літератури даними щодо швидкості росту корозії в різних напрямках.

Визначення статистичних параметрів розвитку корозійного дефекту, яка пов'язує час експлуатації t та характерний розмір дефекту $d_j(t)$, здійснювались на основі степеневих залежностей

$$d_j(t) = k(t - t_0)^\alpha, \quad (1)$$

де t_0 – час появи корозійного дефекту, α та k – це показники кінетики його росту. Процес розвитку корозії є випадковим, що враховується введенням у рівняння (1) показника швидкості росту корозії в різних напрямках, як випадкової величини, що підтверджується численними спостереженнями на практиці та відображено в літературі.

Розподіл значень розмірів дефекту був підпорядкований лог-нормальному закону розподілу

$$f(d_j, t) = \frac{1}{d_j S_j(t) \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln d_j - \mu_j(t))^2}{S_j^2(t)} \right], \quad (2)$$

де $S_j(t)$ та $\mu_j(t)$ – це параметри закону, які залежать від розміру дефекту у

поточний час експлуатації та визначаються через співвідношення (3):

$$\mu_j(t) = \ln \left(\frac{m_j(t)}{\sqrt{1 + \frac{v_j}{m_j^2(t)}}} \right), S_j^2(t) = \ln \left(1 + \frac{v_j}{m_j^2(t)} \right); \quad (3)$$

$$m_j(t) = \langle k_j(t - t_0)^\alpha \rangle = \langle k_j \rangle (t - t_0)^\alpha, \quad (4)$$

де $\langle \dots \rangle$ – оператор усереднення, $m_j(t)$ – математичне очікування, v_j – коефіцієнт варіації.

На рис. 2 схематично зображено розвиток у часі середньої глибини корозійного пошкодження $m_3(t)$ та можливий розкид її значень у часі, а в табл. 1 указані ймовірнісні характеристики швидкості росту корозії в різних напрямках.

Таблиця 1 – Ймовірнісні характеристики габаритних розмірів дефекту

Параметр	Характеристики швидкості росту корозійного дефекту за напрямом	
	Коефіцієнт варіації розмірів дефектів (v_j)	Середнє значення, мм
Довжина	5,2	20
Ширина	2,9	11
Глибина	0,075	0,5

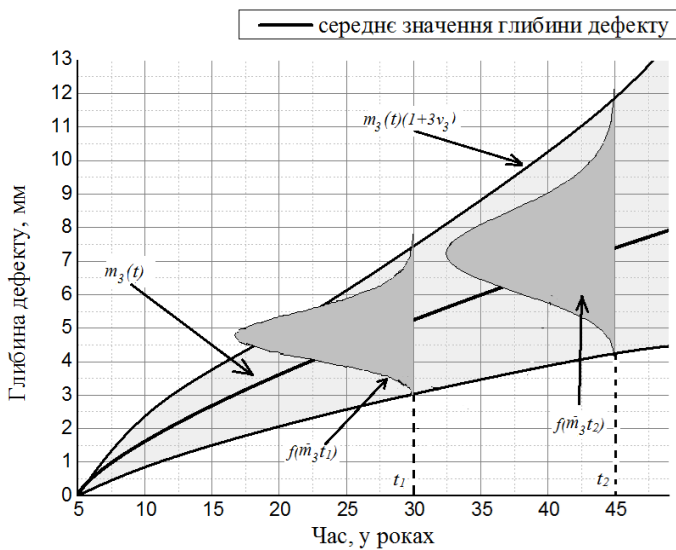


Рисунок 2 – Графік можливої зміни глибини дефекту у часі та у поточний рік експлуатації

У роботі для виконання третього етапу використовуються 3D моделювання. Нелінійна поведінка матеріалу визначається відповідно до моделі кінетичного зміцнення з кусково-лінійною діаграмою деформування, з використанням критерію пластичності за Мізесом.

При цьому вирішується задача пружно-пластичного деформування, яке зводиться до ітераційної процедури, що реалізується методом Ньютона-Рафсона у рамках МСЕ

$$[K(\{U\})]\{U\} = \{R\}. \quad (5)$$

На залишковий ресурс елементів конструкцій, окрім наявних корозійних дефектів впливають процеси накопичення втомних пошкоджень. Тому розглянуті питання математичного моделювання пошкоджуваності елементів конструкцій з корозійним дефектом при накопиченні багато- або малоциклової втоми.

Для оцінки накопичення втомних пошкоджень у конструкції використовується концепція ефективних напружень Работнова-Качанова

$$\tilde{\sigma}_a = \frac{\sigma_{eq}}{1-D}, \quad (6)$$

де D – скалярний параметр пошкоджуваності, σ_{eq} – еквівалентні напруження (у роботі застосовується критерій Мізеса).

Для розрахунків параметру накопичення пошкоджуваності при багатоцикловій втомі використовувалася залежність

$$dD = \frac{\omega_e}{\sigma_{-1}^m N_0 (c+1)} \left(\frac{\sigma_{eq}}{1-D} \right)^c dt, \quad (7)$$

де σ_{-1} – границя витривалості, N_0 , c – параметри кривої Веллера, ω_e – ефективна частота зміни циклів напруження.

Для випадку накопичення пошкоджуваності при малоцикловій втомі, чинником її розвитку є пластичні деформації, тому кінетика накопичення пошкоджуваності визначалася таким чином

$$dD = \left(\frac{\sigma_{eq}^2 R_v}{2ES(1-D)^2} \right)^s dp, p \geq p_D, \quad (8)$$

де S та s – параметри матеріалу, E – модуль пружності, p_D – поріг пластичних деформацій, при яких починає розвиватись пошкоджуваність в матеріалі, R_v – функція тривісності:

$$p_D = \varepsilon_{pD} \left(\frac{\sigma_u - \sigma_y}{\frac{\sigma_{eq\max} - \sigma_{eq\min}}{2} - \sigma_y} \right)^m, \quad R_v = \frac{2}{3} (1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^2. \quad (9)$$

Таким чином, розроблено математичну модель для визначення параметру пошкоджуваності елементів конструкцій з корозійним дефектом при накопиченні багато- або малоциклової втоми.

У **третьому розділі** розроблений розрахунковий підхід впроваджено для оцінки надійності та прогнозу залишкового ресурсу криволінійної частини магістрального трубопроводу. Об'ємний поверхневий дефект моделюється в центрі зовнішньої поверхні ділянки коліна трубопроводу. Для дослідження було обрано дефект у формі паралелепіпеду із закругленими границями. Побудова виконувалась у локальній тороїдальній системі координат.

Для розрахунку НДС використовувавсь 3D моделювання на базі МСЕ у пружно-пластичній постановці. Ділянка трубопроводу навантажена внутрішнім тиском P і закріплюється на краях таким чином, щоб уникнути крайового ефекту. Рівень внутрішнього тиску (ВТ) відповідно до ASME B31.8 (2003) може змінюватися від 7 до 12,8 МПа. Здійснено серію розрахунків коліна трубопроводу з типовими середніми розмірами дефекту відповідно до геометричних параметрів, що відповідають різному часу життя пошкодженого трубопроводу (період від 10 до 45 років). Результати здійснених розрахунків відображено як зміну значення внутрішнього тиску, що призводить до появи пластичних деформацій (рис. 3).



Рисунок 3 – Значення внутрішнього тиску, що призводить до появи пластичних деформацій в конструкції та досягання границі міцності

На рис. 3 лінією з прямокутними маркерами відображено зміну значення внутрішнього тиску в залежності від розмірів дефекту, при якому в конструкції виникають пластичні деформації. На рис. 3 і далі введемо параметр росту дефекту, який змінюється в залежності від глибини дефекту

$$h_j = \frac{h_d}{h_p} \cdot 100\% , \quad (10)$$

де h_j – параметр росту дефекту, h_d – глибина дефекту у певний момент часу, h_p – товщина труби.

Прямими лініями вказано значення максимального зовнішнього навантаження в залежності від області розташування трубопроводу. При експлуатації трубопроводу з дефектом при $h_j > 40\%$ виявлено, що у трубопроводі з'являються незворотні пластичні деформації при максимальному навантаженні навіть у зоні VT4, при мінімальному значенні внутрішнього тиску. Пластичні деформації при номінальному тиску виникають тільки при $h_j > 50\%$, що свідчить про небезпечність експлуатації трубопроводу з такими дефектами. З використанням отриманих даних про НДС трубопроводу з дефектом із заданими розмірами визначено параметр пошкоджуваності при різних рівнях навантаження (рис. 4). Кількість циклів до відмови для випадку $h_j \geq 50\%$ дорівнює від 1 до 8 для навантаження VT1-VT2, а при VT3-VT4 – від 70 до 470 циклів. Якщо враховувати отримані дані про ефективну частоту, яка дорівнює 3 цикли в місяць, то експлуатація трубопроводу з дефектами такого розміру небезпечна.

У випадку розміру дефекту $h_j \leq 40\%$ кількість циклів до відмови від 45 до 55 (близько 16 місяців) при навантаженні VT1-VT2, а при VT3-VT4 – близько 3000 циклів. Загалом можна зробити висновок, що при розмірах дефекту при $h_j \geq 40\%$ трубопровід потребує нагального ремонту.

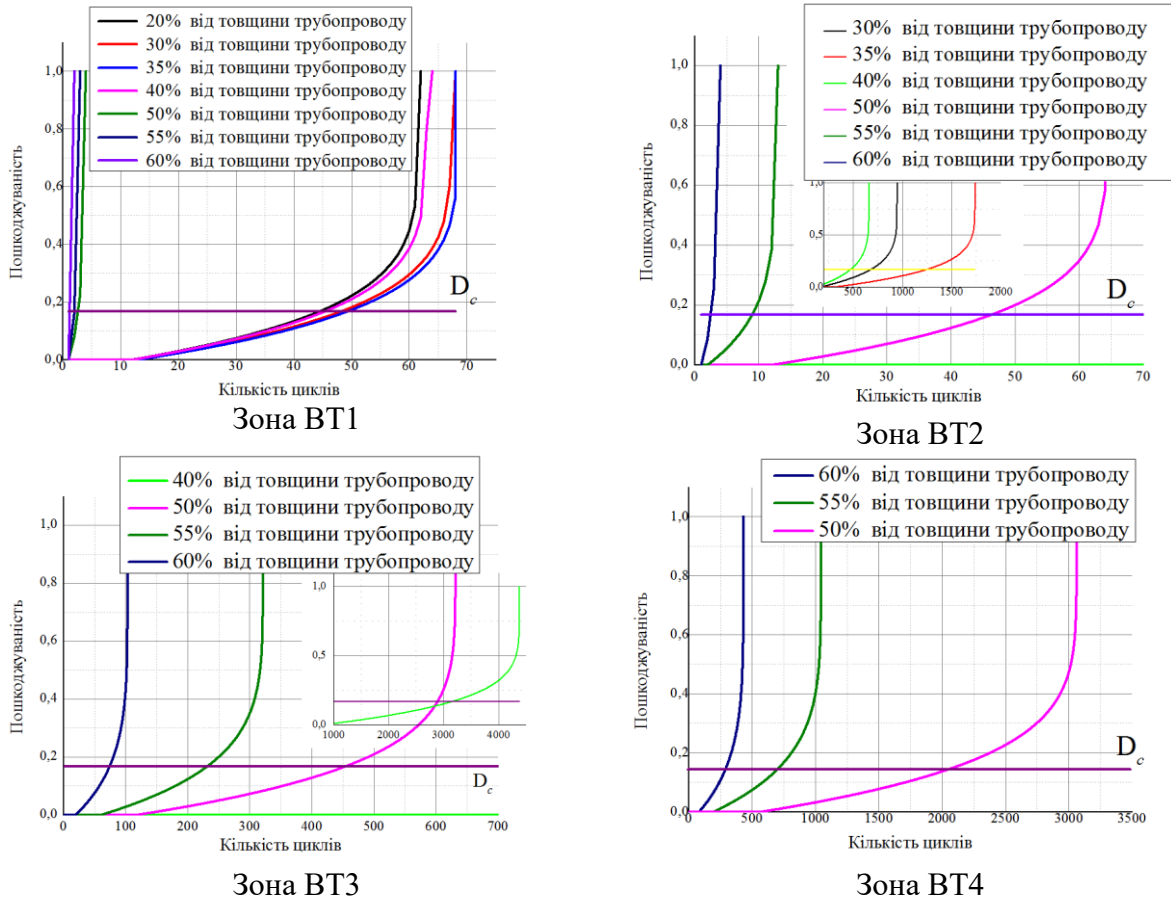


Рисунок 4 – Пошкодженість для трубопроводу з дефектом середніх розмірів у різних зонах

Реальні дефекти із ступенем розвитку корозії h_j звичайно мають дефекти не середніх розмірів, а можуть мати суттєвий розкид (див. рис. 2). Тому для кожного з даних випадків було здійснено біля 200 розрахунків із урахуванням статистично можливої зміни розмірів дефекту.

Отримані ймовірнісні характеристики НДС конструкції при різних рівнях навантаження та у різний термін експлуатації. Сформовані гістограми для еквівалентних напружень при різних рівнях навантаження та визначені математичне очікування (рис. 4), дисперсії та коефіцієнти асиметрії.

Узагальнення даних, представлених як описова статистика, було здійснено на основі апроксимації гістограм (рис. 5) поліномом Лагера, для чого попередньо апроксимовані математичні очікування, дисперсія та коефіцієнти асиметрії поліноміальною регресією.

Після інтегрування отриманих щільностей ймовірності по внутрішньому навантаженню відповідно до терміну експлуатації за наступною формулою

$$Q(p, t) = 1 - \int_0^{\sigma_y} \frac{f_1(\sigma_{eq}/\beta)}{\beta} p, t d\sigma_{eq}, \quad (11)$$

отримано залежність ймовірність появи пластичності (Q) від рівня

навантаження (P) та часу(t), який відпрацювала конструкція (рис. 6), де β – коефіцієнт поліному Лагера.

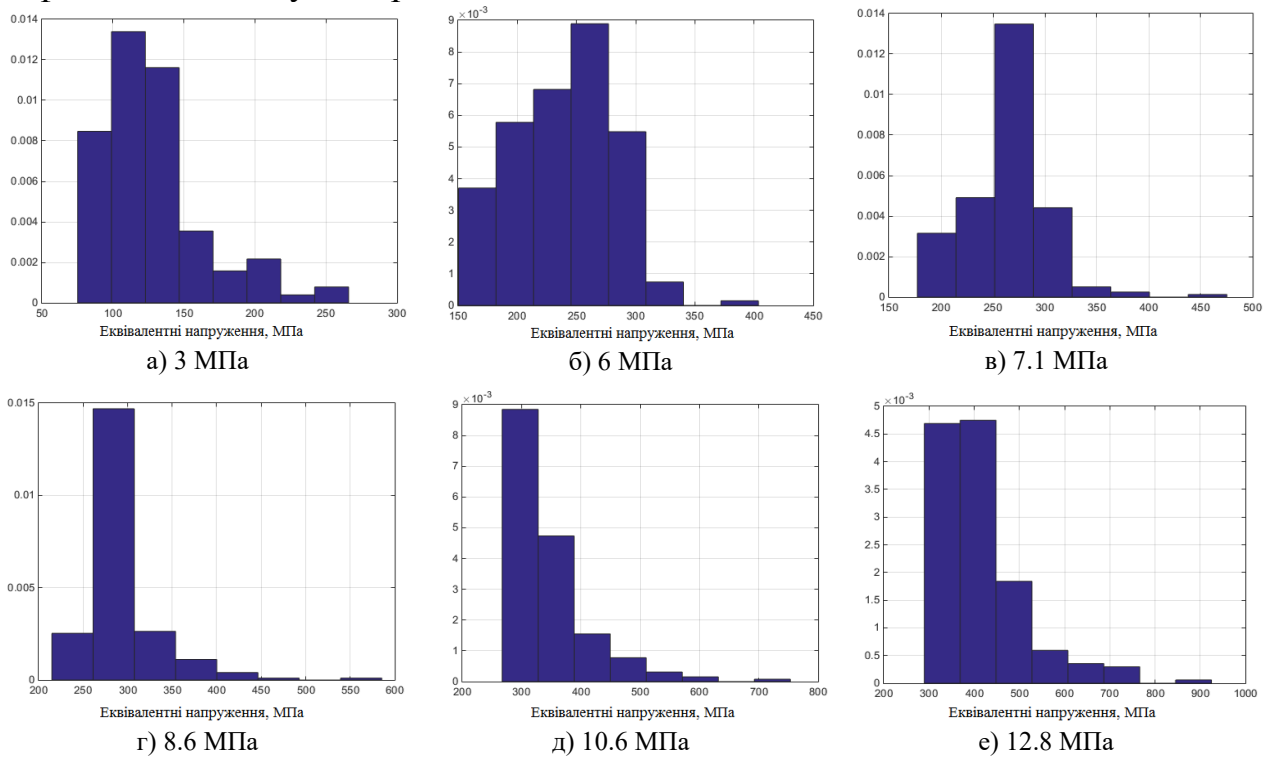


Рисунок 5 – Гістограми розподілу максимальних еквівалентних напружень в конструкції у пошкодженням при $h_j = 60\%$ при різних рівнях навантаження

При експлуатації трубопроводу з $h_j = 50\%$ ймовірність появи пластичних деформації при навантаженні 12,8 МПа дорівнює 0,943. З графіку (рис. 6) видно, що при $h_j = 55$, поява пластичності спостерігається вже не тільки при максимальному навантаженні у відповідній зоні, а й при типовому навантаженні у 6 МПа.

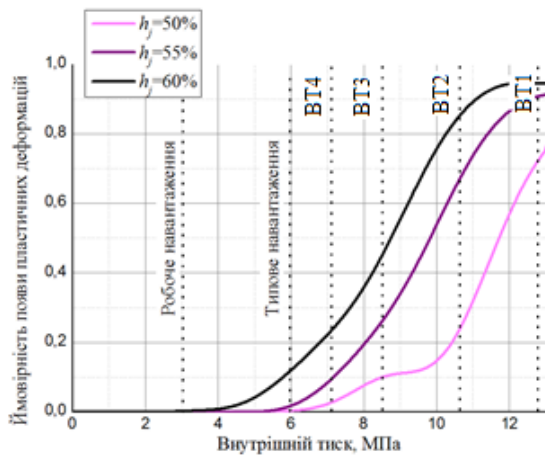


Рисунок 6 – Ймовірність появи пластичних деформації в конструкції при різних термінах експлуатації та рівнів навантаження

При максимальному навантаженні у 12,8 МПа ймовірність появи пластичності майже дорівнює одиниці (0,995), що свідчить про те, що майже при усіх варіаціях розмірів дефектів з'являються пластичні деформації. З отриманих результатів видно, що при збільшенні параметру h_j на 5% кількість циклів до відмови зменшується у 7 разів у випадку зміни від 50 до 55 відсотків та у 2,5 рази – від 55 до 60 відсотків.

Визначено математичне очікування пошкоджуваності при $h_j = 50\%$; 55%; 60%; та довірчий інтервал із використанням

отриманих статистичних розрахунків НДС криволінійної частини трубопроводу з дефектом у зоні ВТ1 (рис. 7, 8).

На рис. 9 зображено значення кількості циклів до відмови при $D = D_c$ для кожної з зон експлуатації (ВТ1-ВТ4) та при різних значеннях параметру $h_j = 50\%; 55\%; 60\%$; та довірчий інтервал з імовірністю 90%.

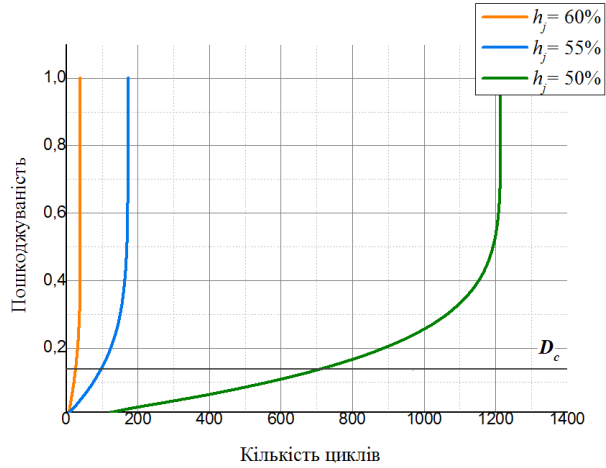


Рисунок 7 – Математичне очікування пошкоджуваності при $h_j = 50\%; 55\%; 60\%$;

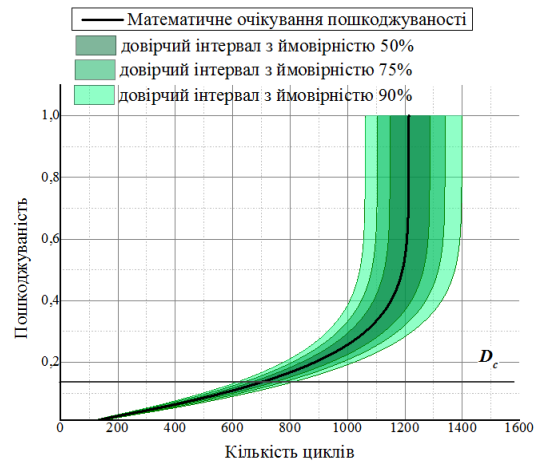


Рисунок 8 – Пошкоджуваність у зоні ВТ1 при $h_j = 50\%$

З отриманих даних видно, що довірчий інтервал зменшується при збільшенні значення внутрішнього тиску.

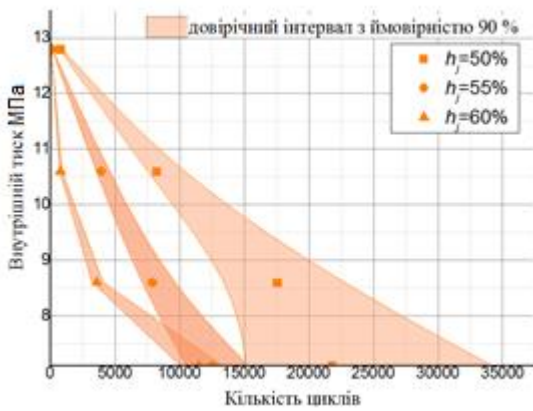


Рисунок 9 – Кількість циклів до відмови у всіх зонах експлуатації при $D = D_c$

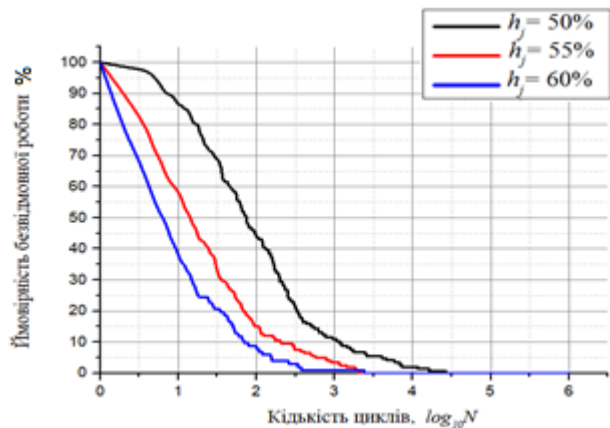


Рисунок 10 – Ймовірність безвідмовної роботи при навантаженні зони ВТ1

Кількість циклів до відмови при експлуатації у зоні ВТ3 та ВТ4 достатньо велика при усіх розмірах дефекту (від 3000 до 16000 циклів). Це свідчить про те, що експлуатація у цих зонах трубопроводу з відповідним дефектом є безпечною, але потребує діагностики. У зоні ВТ2 кількість циклів до відмови значно менша (від 150 до 9000), тому при $h_j \geq 55\%$ слід здійснювати планування роботи. При навантаженні ВТ1 ймовірність безвідмовної роботи менше 96% починаючи зі 100 циклів роботи. Із цих результатів можна зробити висновок, що експлуатація трубопроводу з дефектом відповідних розмірів може бути небезпечною.

У четвертому розділі досліджується вплив композиційного бандажу на ресурс трубопроводу з дефектом середніх розмірів. Для визначення раціональних розмірів композиційного бандажу здійснювалися попередні розрахунки криволінійної частини трубопроводу з дефектом фіксованих розмірів. На рис. 11 наведені результати розрахунків. Здійснено розрахунки для визначення значення внутрішнього тиску, за якого еквівалентні напруження досягають границі міцності у трубопроводі з бандажем різної товщини від 25 мм до 175 мм, але з фіксованими іншими розмірами (рис. 12). Як видно з результатів, у даному випадку товщина бандажу починаючи з 75 мм не надає значного впливу на величину навантаження, при якому досягається границя міцності.

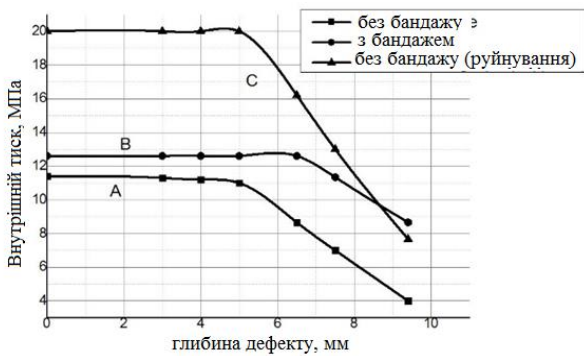


Рисунок 11 – Вплив корозійного дефекту на рівень внутрішнього тиску

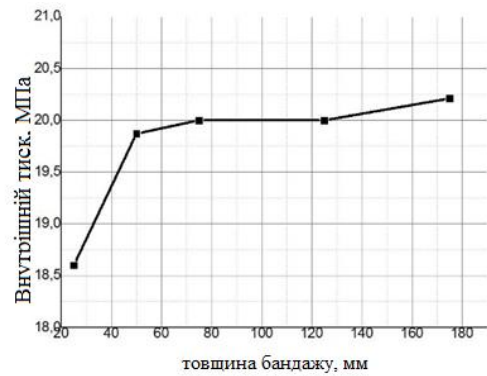


Рисунок 12 – Значення внутрішнього тиску при $\sigma_{eq} = \sigma_B$

Розглянуто вплив композиційного бандажу на НДС трубопроводу з дефектом, для якого здатні змінюватись усі 3 габаритні розміри у своїх середніх значеннях. Розмір бандажу було обрано 75 мм.

Наступним кроком визначено кількість циклів до відмови трубопроводу з дефектом за наявності композиційного бандажу. Із використанням створеної математичної моделі визначено параметр пошкоджуваності при навантаженні 12,8 МПа. Застосування композиційного бандажу дає можливість кількість циклів до відмови істотно збільшувати (рис. 13).

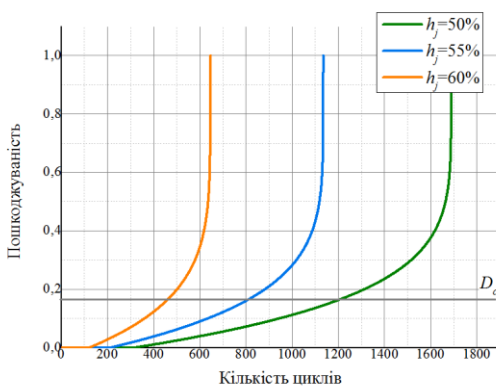


Рисунок 13 – Пошкоджуваність трубопроводу при навантаженні ВТ1

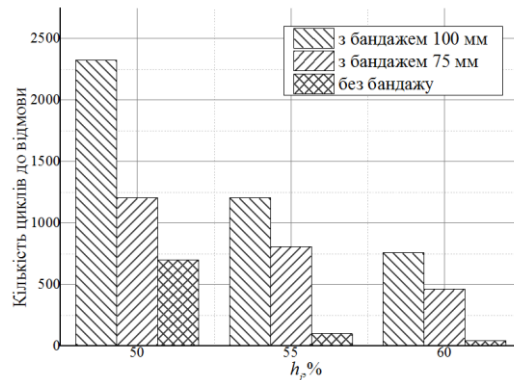


Рисунок 14 – Середня пошкоджуваність трубопроводу при навантаженні ВТ1 з бандажем 75 мм та 100 мм та без бандажу

Збільшення товщини бандажу при дефекті з параметром $h_j \geq 50\%$ не усуває наявності пластичних деформацій, але їх значення зменшуються, що впливає на параметр пошкоджуваності. Тому було визначено кількість циклів до відмови для трубопроводу з бандажем, товщина якого збільшена до 100 мм (рис. 14). Із результатів видно, що при збільшенні товщини бандажу на 25 мм, кількість циклів до відмови збільшується у 1,5 або 2 рази відповідно до розміру дефекту. Із цього можна зробити висновок, що при дефекті з параметром $h_j \geq 50\%$ раціонально використовувати бандаж товщиною 100 мм.

У п'ятому розділі розглянуто питання оцінки залишкового ресурсу насосу, що працює в понадпроектний термін експлуатації в лінії відцентрових насосів електростанції. Наведено результати теоретичних досліджень його НДС

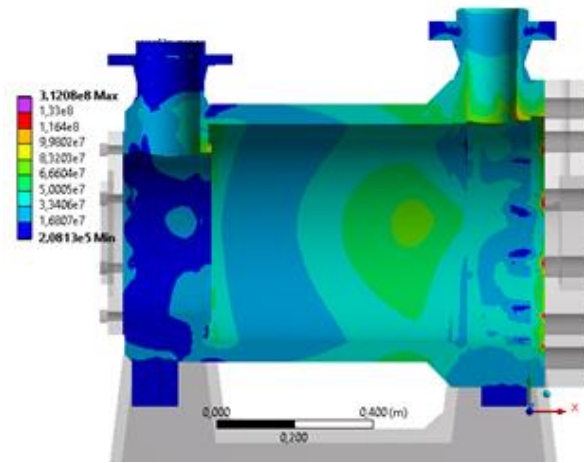


Рисунок 15 – Вплив стоншення стінки корпусу на розподіл напружень

з урахуванням зміни геометрії корпусних деталей, яка спостерігалася по закінченні проектного терміну експлуатації. Оцінка статичної міцності здійснювалась для основних експлуатаційних режимів роботи насоса (нормальні умови експлуатації (НУЕ)) та при стоншенні стінки корпусу. Для вивчення НДС при НУЕ насоса враховувати наявні нерівномірний розподіл температури по стінці корпусу і кришок, а також нерівномірний розподіл внутрішнього тиску, тобто задавався лінійно розподілений тиск від вхідного патрубку до напірної кришки (від 0.65 МПа до 12.3 МПа). Результати розрахунків НДС при такій схемі навантаження наведені на рис. 15.

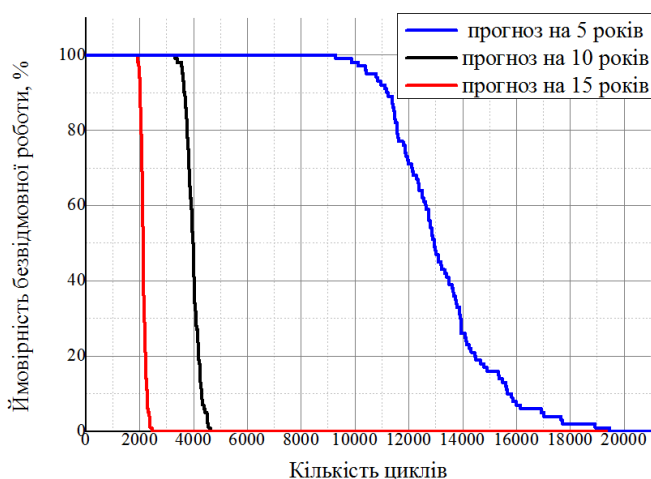


Рисунок 16 – Ймовірність безвідмовної роботи конструкції при прогнозі на 5, 10 та 15 роботи понадпроектний термін

з урахуванням зміни геометрії корпусних деталей, яка спостерігалася по закінченні проектного терміну експлуатації. Оцінка статичної міцності здійснювалась для основних експлуатаційних режимів роботи насоса (нормальні умови експлуатації (НУЕ)) та при стоншенні стінки корпусу. Для вивчення НДС при НУЕ насоса враховувати наявні нерівномірний розподіл температури по стінці корпусу і кришок, а також нерівномірний розподіл внутрішнього

тиску, тобто задавався лінійно розподілений тиск від вхідного патрубку до напірної кришки (від 0.65 МПа до 12.3 МПа). Результати розрахунків НДС при такій схемі навантаження наведені на рис. 15.

Максимальні напруження в корпусі насоса сконцентровані в районі отворів під шпильки, які фіксують напірну кришку, і складають 196 МПа, що дорівнює гранці міцності. Для оцінки надійності конструкції були зі стоншеною на 10%, що спостерігається після експлуатації насосу за проектний термін та при прогнозованому стоншенні для подальшої експлуатації. Були отримані ймовірнісні характеристики накопичення втомних пошкоджень у процесі

експлуатації (рис. 16). Визначена ймовірність безвідмовної роботи конструкції при прогнозованому стоншенні стінки. Визначено, що при подальшій експлуатації за період 15 років гарантований ресурс буде дорівнювати 2 роки.

У додатках наведено список публікацій здобувача, акти впровадження та код скриптової програми для визначення параметру пошкоджуваності.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливу і актуальну науково-практичну задачу динаміки та міцності машин – розвиток методів та підходів до прогнозування надійності та оцінки залишкового ресурсу елементів конструкцій, що використовуються в транспортуванні енергоносіїв та в енергетичному машинобудуванні, та які мають набуті пошкодження корозійної природи, на основі статистичної оцінки концентрації напружено-деформованого стану і процесів накопичення втоми. При цьому сформульовано наступні висновки:

1. Здійснений аналіз наукових робіт стосовно технічного стану системи транспортування та збереження нафтопродуктів за допомогою трубопроводів та інших компонентів енергетичної системи, і видів пошкоджень, що виникають при їх експлуатації, що дало можливість визначити актуальність цієї роботи, необхідність розробки нових методів та підходів для прогнозування залишкового ресурсу та визначення ймовірності безвідмовної роботи, а також сформулювати мету і задачі дисертаційного дослідження.

2. Із застосуванням концептуальних підходів для теоретичної оцінки процесів накопичення втоми в рамках континуальної механіки пошкоджуваності удосконалені методи оцінки надійності та прогнозу залишкового ресурсу пошкоджених ділянок елементів конструкцій, які, на відміну від відомих, дають можливість враховувати статистичний прогноз можливих розмірів корозійних дефектів у часі.

3. Розроблено параметричні математичні моделі визначення напружено-деформованого стану елементів конструкції складної криволінійної геометрії за наявності тривимірного поверхневого дефекту корозійного характеру. Для створення адекватної скінченно-елементної сітки криволінійних частин елементів конструкцій були здійснені тестові розрахунки щодо раціонального вибору кількості та розмірів скінчених елементів до отримання допустимої похибки, що дало можливість провести розрахунки для визначення НДС конструкції з дефектом.

4. Здійснено дослідження особливостей формування концентрації напружень в пошкоджених ділянках елементів конструкцій із урахуванням експлуатаційної варіації навантаження та стохастичного характеру розвитку корозійного пошкодження. Оцінка його впливу на залишкову міцність базується на статистичному моделюванні Монте-Карло з урахуванням експлуатаційного навантаження та статистичного прогнозу можливої варіації розмірів дефектів від корозії. Визначено, що при експлуатації конструкції з

дефектом при глибині більше ніж 40 % від товщини стінки з'являються незворотні пластичні деформації при мінімальному навантаженні, що дало можливість на основі отриманих статистичних даних визначити, що ймовірність появи пластичності у дефекті дорівнює 0,995, що свідчить про те, що майже при усіх варіаціях розмірів дефектів з'являються пластичні деформації.

5. З використанням розробленого підходу до прогнозування надійності елементів конструкцій були вирішені наступні практичні задачі:

– визначено параметри пошкоджуваності та кількість циклів до відмови коліна трубопроводу з тривимірним поверхневим дефектом середніх розмірів із урахуванням експлуатаційної варіації навантаження, які мають значення в межах від 1 до 50 циклів (до 1,5 років) при максимально можливому навантаженні та від 70 до 470 циклів (від 2 до 10 років) при мінімальному навантаженні у трубопроводі з дефектом середніх розмірів, а у випадку дефекту, що стохастично розвивається, кількість циклів до відмови складає від 42 до 700 (від 14 місяців до 20 років) при максимально можливому навантаженні;

– досліджено вплив композиційного бандажу на ресурс трубопроводу з дефектом середніх розмірів. Здійснені розрахунки для визначення раціональних розмірів композиційного бандажу для криволінійної частини трубопроводу з дефектом із середніми розмірами. Визначено значення внутрішнього тиску, при якому еквівалентні напруження досягають границі міцності у трубопроводі з бандажем різної товщини (від 25 мм до 175 мм). Установлено, що за наявності бандажу 75 мм при глибині дефекту менше ніж 40 % від товщини трубопроводу еквівалентні напруження зменшуються на 10 % та при максимально можливому навантаженні не виникають пластичні деформації. У випадку глибини дефекту більше ніж 40 % від товщини трубопроводу у трубопроводі еквівалентні напруження зменшуються від 25% до 50% при різних розмірах дефекту відповідно та дорівнюють границі плинності. Кількість циклів до відмови при використанні композиційного бандажу збільшилась у 100 разів, що робить можливою подальшу експлуатацію трубопроводу;

– здійснено оцінку залишкової міцності насоса, який використовується в енергетичному машинобудуванні з урахуванням зменшення товщини стінок корпусних деталей від ерозійно-корозійного зносу. Визначено НДС конструкції при стоншенні стінок корпусу від 10% до 30%, яке можливо при тривалій експлуатації. Отримані значення кількості циклів до відмови при урахуванні накопичення втомних пошкоджень та впливу експлуатаційного зносу конструкції.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Потопальська К. Є. Огляд сучасних моделей розвитку корозійних пошкоджень та напрямів дослідження їх впливу на міцність і надійність елементів трубопровідних систем. *Вісник НТУ "ХПІ" Динаміка та міцність*

машин. 2016. № 46. С. 60–66.

2. Потопальська К. Є., Ларін О. О. Оцінка залишкової міцності криволінійної ділянки трубопроводу зі статистично заданим корозійним дефектом, що розвивається у часі. *Міжвузівський збірник “Наукові нотатки”*. 2017. №60. С. 137–146.

Автором побудовано параметричну тривимірну SE-модель ділянки трубопроводу з дефектом в його стінці, спрогнозовано геометричні параметри які задаються ймовірно, та визначено статистичні параметри НДС конструкції.

3. Потопальська К.Є., Ларін О. О. Оцінка залишкової міцності криволінійної ділянки трубопроводу з корозійним об’ємним дефектом, що розвивається. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2017. № 3(53). С. 12–19.

Здобувачем побудовано параметричну модель ділянки трубопроводу з дефектом середніх розмірів в його стінці та проведено розрахунки його залишкової міцності при різних рівнях внутрішнього навантаження.

4. Потопальська К. Є., Ларін О. О. Оцінка надійності та прогнозування ресурсу елементів трубопроводу з урахуванням процесів накопичення втоми та розвитку корозії. *Вісник Хмельницького національного університету: наук. журн.* 2019. №1. С. 46 – 52.

Здобувачем розроблено математичну модель для визначення накопичення втомних пошкоджень у трубопроводі з корозійним дефектом, спрогнозовано його можливі геометричні характеристики та отримані параметри надійності.

5. Larin O., Potopalska K., Mygushchenko R. Statistical estimation of residual strength and reliability of corroded pipeline elbow part based on a direct FE-simulations. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*. 2018. № 1. P. 80–95.

Здобувачем розроблено параметричну тривимірну скінченно-елементну модель ділянки трубопроводу з дефектом, що стохастично розвивається. Проведено статистичний аналіз отриманих даних стану НДС та визначень ймовірність появи пластичних деформацій у конструкції з дефектом.

6. Потопальская К.Е., Ларин А. А., Келин А. А., Нарыжная Р. Н., Трубаев А.И. Анализ прочности насоса с целью продления его ресурса. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2018. № 3. С. 30–35.

Здобувачем побудовано комплекс тривимірних геометричних моделей насосу, який дає змогу аналізувати зміну НДС внаслідок корозійного зносу стінок корпусу насосу.

7. Larin O., Potopalska K., Mygushchenko R. Reliability of the Rubber Tube of Automotive Hydraulic Braking System Under Fatigue Failures Considering Random Variation of Load and the Process of Aging of Material. *Journal of Solid Mechanics*. 2019. № 2. P. 361–374.

Здобувачем розроблено алгоритм надійності для елементів конструкції, які мають криволінійну геометрію та випадкову варіацію НДС.

8. Larin O., Potopalska K. An estimation of the residual reliability of the pipeline elbow with VSD. *Innovative Solutions in Repair of Gas and Oil Pipelines, Sofia: Bulgarian Society for Non-destructive Testing Publishers, 2016. С. 214–227.*

Здобувачем побудовано параметричну тривимірну SE-модель ділянки трубопроводу з дефектом із заданими розмірами в його стінці. Проведені розрахунки для визначення НДС конструкцій та на основі розробленої математичної моделі визначено параметри надійності.

9. Mirchev Y., Larin O., Potopalska K. Investigation of influence of the repair bandage on the stress-strain state of the pipeline elbow with VSD. „*NDT days 2016*”/ „*Дни на безразрушителния контрол 2016*”. 2016. № 1. P. 411–414.

Здобувачем побудовано параметричну модель криволінійної ділянки трубопроводу з дефектом в його стінці, та з композиційним бандажем у області з дефектом. Проведені розрахунки для визначення НДС конструкцій, та визначення особливостей впливу бандажа на НДС конструкції визначено раціональні розміри композиційного бандажу.

10. Потопальська К. Е. Скінчено-елементний аналіз впливу корозійного дефекту еліпсоїдної форми, що розположений на криволінійній частині труби на її напружено-деформований стан. *Современные проблемы естественных наук – Тараповские чтения, м. Харків, 10-22 березня 2016 р., Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2016. Ч. 1, С. 63..*

11. Потопальська К. Е. Моделювання корозійного дефекту прямокутної форми на коліні магістрального трубопроводу. *Інформаційні техноло- 21 гії: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції у 4-х частинах, м. Харків, 18-20 травня 2016 р. Харків: НТУ «ХП», 2016. Ч. 1, С. 64.*

12. Потопальська К. Є., Ларін О. О. Оцінка залишкової міцності криволінійної ділянки трубопроводу з корозійним об'ємним дефектом, що розвивається. *Актуальні проблеми інженерної механіки; тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції, м. Одеса, 16-19 травня 2017 р. Одеса: ОДАБА, 2017. С. 226–227.*

Здобувачем побудовано параметричну тривимірну SE- модель ділянки трубопроводу з дефектом середніх розмірів в його стінці та проведено розрахунки його залишкової міцності.

13. Потопальська К. Є., Ларін, О. О. Оцінка залишкового ресурсу трубопроводів із зовнішнім корозійним дефектом при відмовах внаслідок втоми. *Сучасні проблеми механіки та математики: тези доповідей міжнародної конференції у 3-х томах, м. Львів, 22-25 травня 2018 р. Львів: ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2018.Т. 2, С. 230–231.*

Здобувачем розроблено математичну модель для визначення ресурсу при малоцикловій втомі у трубопроводі з корозійним дефектом.

14. Потопальська К. Є., Ларін О. О. Статистична оцінка залишкової міцності та надійності корозійно пошкодженого трубопроводу: *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2018 у 4-х частинах,*

м. Харків, 16- 18 травня 2018 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2018.С. 55.

Здобувачем розроблено параметричну тривимірну скінченно-елементну модель ділянки трубопроводу з дефектом, що стохастично розвивається. Проведено статистичний аналіз отриманих даних стану НДС та визначень ймовірність появи пластичних деформацій у конструкції з дефектом.

15. Ларін О. О., Потопальська К. Є. Оцінка залишкового ресурсу коліна трубопроводу з пошкодженням корозійної природи при відмовах, що викликані втомою: Матеріали XIX-МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», м. Київ, 19-22 червня 2018 р., Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. Ч. 2, С. 85-86.

Здобувачем виконано розрахунки щодо оцінки залишкового ресурсу коліна трубопроводу з пошкодженням корозійної природи при відмовах, що викликані втомою.

АНОТАЦІЇ

Потопальська К.Є. Прогнозування надійності елементів конструкцій з локальними корозійними пошкодженнями на основі статистичної оцінки статичної та циклічної міцності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2019.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-прикладної задачі, яка полягає у розвитку методів комп'ютерного аналізу залишкової міцності та прогнозування надійності елементів конструкцій енергетичного машинобудування, які за час тривалої експлуатації отримали корозійне зношення чи локальні пошкодження. Дослідження здійснені в рамках статистичних методів моделювання, а оцінка характеристик напружено-деформованого стану пошкоджених елементів конструкцій проводилась на основі методу скінчених елементів у тривимірній постановці.

Розроблено підхід для теоретичної статистичної оцінки процесів накопичення втоми, який покладено в основу розрахункового методу прогнозу надійності елементів конструкцій, які мають набуті пошкодження корозійної природи на основі статистичної оцінки концентрації напружено-деформованого стану і процесів накопичення втоми.

Здійснено комплексні дослідження можливих рівнів концентрації напружень у пошкоджених ділянках конструкцій з урахуванням експлуатаційної варіації навантаження та стохастичного характеру розвитку пошкодження корозійної природи. Виконано практичні розрахункові дослідження надійності елементів конструкцій, які використовуються у транспортуванні енергоносіїв та енергетичному машинобудуванні, що дало можливість розробити рекомендації щодо можливого подовження строку їхньої роботи та можливості відновлення працездатності.

Ключові слова: надійність, ресурс, континуальна пошкоджуваність, втома, трубопроводи, відцентрові насоси.

Потопальская К.Е. Прогнозирование надежности элементов конструкций с локальными коррозионными повреждениями на основе статистической оценки статической и циклической прочности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи, которая заключается в развитии методов компьютерного анализа остаточной прочности и прогнозирования надежности элементов конструкций энергетического машиностроения, которые за время длительной эксплуатации получили коррозионный износ или локальные повреждения. Исследования проведены в рамках статистических методов моделирования, а оценка характеристик напряженно-деформированного состояния поврежденных элементов конструкций проводилась на основе метода конечных элементов в трехмерной постановке.

Разработан подход к теоретической статистической оценке процессов накопления усталости, который положен в основу расчетного метода прогноза надежности элементов конструкций при одновременном протекании процессов накопления усталости и развития коррозионного дефекта.

Проведены комплексные исследования возможных уровней концентрации напряжений в поврежденных участках конструкций с учетом эксплуатационной вариации нагрузки и стохастического характера развития повреждения коррозионной природы. Выполнены практические расчетные исследования надежности элементов конструкций, используемых в транспортировке энергоносителей и энергетическом машиностроении. На основе проведенных исследований разработаны рекомендации относительно возможного продления срока их работы и возможности восстановления работоспособности.

Ключевые слова: надежность, ресурс, континуальная повреждаемость, усталость, трубопроводы, центробежные насосы.

Potopalska K.E. Predicting the reliability of structural elements with local corrosion damage based on the statistical evaluation of static and cyclic strength. - Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in specialty 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines. – National Technical University, «Kharkiv Politechnical Institute», Kharkiv, 2019.

The thesis is devoted to the solution of the actual scientific and applied task, which consists in the development of methods of computer analysis of residual durability and the prediction of reliability of elements of power engineering structures, which have been corrosive wear or local damage during long operation.

The studies were performed within the framework of statistical modeling methods, and the evaluation of the characteristics of the deformed state of damaged structural elements was performed on the basis of the finite element method (FEM) in three-dimensional formulation.

With the use of conceptual approaches for the theoretical assessment of fatigue accumulation processes within the framework of continual damage mechanics, improved methods for assessing the reliability and prediction of the residual life of damaged sections of structural elements, which, unlike known ones, are allowed to taken into account the statistical prediction of possible corrosion sizes.

Complex researches of possible levels of stress concentration in the damaged sections of structures are made taking into account the operational variation of load and the stochastic nature of the development of corrosion damage.

A statistical analysis and generalization of the obtained results were conducted. The investigation peculiarities of the stress concentration in the damaged areas of structural elements taking into account the operational load variations and the stochastic nature of the corrosion damage.

The estimation of its effect on the residual strength is based on the Monte Carlo statistical simulation, taking into account the operational load and the statistical prediction of the possible variation in the size of the corrosion defects. An approach for theoretical statistical estimation of processes of fatigue accumulation is developed, which is the basis of the calculated method of predicting the reliability of structural elements, which will be determined by the simultaneous course of processes of fatigue accumulation and the development of corrosion defect.

A set of practical calculation studies aimed at assessing the reliability of structural elements used in energy transportation and power engineering has been carried out and recommendations have been developed on the basis of the conducted research on the possible extension of their life and the possibility of restoration of efficiency. The parameters of damage and the number of cycles to failure of the elbow of the pipeline with a three-dimensional surface defect of mean size were determined taking into account the operational variation of load.

The influence of composite bandage on the mean-sized pipeline resource is investigated. Calculations were made to determine the rational dimensions of the composite bandage for the curved portion of the mean-sized defect pipeline. The value of the internal pressure at which the equivalent stresses reach the strength limits in the pipeline with a bandage of different thickness is determined. The residual strength of the pump used in power engineering has been evaluated, taking into account the reduction of the wall thickness of the body parts from erosion-corrosion wear.

Keywords: reliability, life-time, continuous damage, fatigue, pipelines, centrifugal pumps.



Відповідальний за випуск
Вчений секретар НТУ «ХП»
д.т.н., проф. Заковоротний О.Ю.

Підписано до друку 11.11.2019 р. Формат 60x84/16.
Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0.9
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення №
