

## РЕФЕРАТ

наукової роботи

### “Оптико-акустичне діагностування корозійно-механічного руйнування елементів конструкцій”

авторського колективу у складі

кандидата технічних наук, наукового співробітника Ю.І. Канюка,  
кандидата фізико-математичних наук, наукового співробітника А.Б. Чорненського,  
кандидата технічних наук, молодшого наукового співробітника І.П. Штойка,  
молодшого наукового співробітника І.В. Стасишина,  
висунутої на здобуття премії Президента України  
для молодих вчених за 2021 р.

**Вступ.** Інтенсивний розвиток хімічної, енергетичної, нафтогазової та інших галузей промисловості, а також вичерпання проектного ресурсу більшості наявного в них обладнання тривалого експлуатування зумовили спрямування зусиль на вирішення проблеми щодо забезпечення його гарантованого ресурсу. Особливо це стосується обладнання та виробів, що працюють у корозивних робочих середовищах із сумісною дією статичного та циклічного навантаження. Одночасна дія цих чинників, найнебезпечнішим з яких є корозійне розтріскування матеріалів і корозійна втома, зумовлює передчасне руйнування виробів та елементів конструкцій.

Втрати, спричинені корозією, в різних галузях промисловості, у військовій сфері та в побуті, щорічно сягають мільярдів у доларовому еквіваленті. Так, у розвинутих країнах прямі втрати від корозії становить 4,2 % вартості валового національного продукту. Водночас, непередбачувані аварії відповідального обладнання згаданих промисловостей призводять до людських жертв. Сукупність цих чинників загостило увагу на створенні методів виявлення та моніторингу корозії і росту субкритичних тріщин, зумовлених нею.

Для діагностування стану згаданого вище обладнання, а відтак і для прийняття рішень щодо подальшого його експлуатування, застосовують методи неруйнівного контролю. Серед них останнім часом виділяють метод акустичної емісії та методи фазозсувної інтерферометрії. З огляду на це, актуальною і важливою науково-технічною проблемою є створення методологічних засад діагностування корозійно-механічного руйнування елементів конструкцій та подовження їх ресурсу, виходячи з результатів моніторингу чи обстеження об'єктів контролю саме цими новітніми методологічними підходами.

**Мета досліджень** – розроблення теоретичних основ, а відтак і методологічних засад оптико-акустичного діагностування стану та визначення залишкової довговічності елементів конструкцій, підданих дії корозивно-механічного руйнування.

Досягнення мети передбачає:

- розроблення математичних моделей та методів опису кінетики поширення втомних тріщин в матеріалах і елементах конструкцій, визначення на цій основі періоду їх залишкового ресурсу;

- розроблення акустико-емісійної методики визначення моменту старту тріщини в елементах конструкцій тривалого експлуатування і визначення на цій основі періоду їх докритичного росту;
- побудову сингулярних інтегральних рівнянь крайових задач плоскої теорії пружності для квазіортотропного тіла, що містить отвори та тріщини;
- розвиток числових методів розв'язування сингулярних інтегральних рівнянь двовимірних крайових задач теорії пружності для квазіортотропного тіла з отворами та вирізами з різним радіусом закруглення вершини;
- урахування деградації матеріалів конструкцій в часі під час визначення їх ресурсу за наявності поверхневих тріщин; дії на них постійного чи змінного навантаження, наводнювання та ґрунтової корозії.
- розроблення методу визначення залишкового ресурсу труб нафтопроводів із зовнішньою поверхневою тріщиною за тривалої дії внутрішнього тиску, корозивного середовища і гідрударів;
- оцінювання впливу водневого середовища на поверхню сталей з різною структурою.
- побудову критеріїв оцінки розміру втомної зони передруйнування в околі концентраторів напружень та прогнозування місця старту втомної макротріщини елементів конструкцій за аналізом рельєфу їх поверхні, визначеного оптико-цифровими методами контролю.

### **Обґрунтування об'єднання в єдину роботу**

Дослідження Ю. І. Канюка, А. Б. Чорненького, І. П. Штойка, І. В. Стасишина тісно пов'язані між собою, оскільки стосуються розв'язання важливого наукового завдання: розробки ефективних моделей, методів та засобів, які в сукупності утворюють теоретико-експериментальні засади діагностування стану та визначення залишкової довговічності елементів конструкцій, які руйнуються під впливом різних корозійно-механічних чинників. Молодими науковцями розроблено підходи до оцінювання кінетики розвитку в цих умовах дефектів типу тріщин наявних в елементах конструкцій, зокрема, нафтопроводах, газопровадах, механічних елементах залізничного транспорту, тощо.

Отже, об'єднання праць в єдину роботу **обґрунтовується** однією метою, об'єктом та методологією досліджень, а отримані результати за запропоновані науково-технічні рішення можуть бути використані під час діагностування стану та визначення залишкової довговічності елементів конструкцій, тривалого експлуатування різних галузей промисловості та транспорту.

### **Наукова новизна роботи полягає у такому:**

- Розроблено модель оцінювання періоду зародження втомної тріщини у вершині гладкої мікрораковини на осі залізничної колісної пари.
- Розроблено методику розрахунку залишкового ресурсу осі колісної пари з тріщиноподібними дефектами за реалізації змішаних макромеханізмів руйнування.

- Запропоновано акустико-емісійну експрес-методику діагностування зародження та розвитку підповерхневих тріщин кілець буксового підшипника локомотивів.
- Розраховано поля пружно-пластичних деформацій у бандажі залізничного колеса під час його встановлення на колісний центр.
- Першу основну задачу теорії пружності для квазіортотропної площини з криволінійними тріщинами зведено до сингулярних інтегральних рівнянь. Вперше встановлено аналогію між задачами теорії пружності для ізотропного та квазіортотропного тіл.
- Побудовано розв'язки задач на власні значення для квазіортотропної площини з напівнескінченим кутовим вирізом. Методом сингулярних інтегральних рівнянь отримано такого ж типу розв'язки для квазіортотропної площини з кутовим закругленим вирізом. Отримано залежності між коефіцієнтами інтенсивності та концентрації напружень у гострій та закругленій вершинах напівнескінченного кутового вирізу.
- Розвинуто єдиний підхід до визначення концентрації напружень біля закруглених та гострих вершин кутових вирізів.
- Побудовано розв'язки плоскої періодичної задачі теорії пружності для квазіортотропної площини з нескінченим рядом близько розміщених криволінійних отворів. Граничним переходом отримано коефіцієнти інтенсивності та концентрації напружень у гострих та закруглених вершинах двобічних кутових вирізів.
- Розроблено математичну модель для визначення залишкового ресурсу труби газопроводу за циклічної зміни тиску газу і наводнення її стінки.
- Побудовано розрахункову модель для визначення кінетики і періоду докритичного росту втомної тріщини у кільцевому зварному шві стінки труби газопроводу.
- Розроблено метод визначення залишкового ресурсу труб нафтопроводів із зовнішньою поверхневою тріщиною за турбулентного потоку нафти і гідроударів.
- Враховано деградацію в часі матеріалів труб при визначенні їх ресурсу за наявності поверхневих тріщин та дії постійного тиску в газопроводах, змінного тиску в нафтопроводах, наводнювання та ґрунтової корозії.
- Розроблено новий метод трикрокової фазозсувної інтерферометрії, що дало змогу в часі, наближеному до реального, відтворювати рельєф поверхні з похибкою, яка не перевищує 5 нм.
- Запропоновано новий підхід до виділення компонентів рельєфу хвилястості та шорсткості за використання об'ємних геометричних параметрів, що дає можливість обчислювати їх на всій ділянці спостереження (відповідно до ISO 25178).
- Розвинуто підхід до визначення ймовірного місця зародження втомної макротріщини та розмірів втомної зони передруйнування за аналізом змін шорсткості поверхні. Цей підхід дає змогу працювати з матеріалами, що мають довільну пластичність.
- Розроблено нову інформаційну технологію контролю поверхні сталей різної структури після дії на них водню та досліджено динаміку змін

рельєфу і визначено геометричні параметри поверхневих новоутворень – блістерів у різні моменти часу після наводнювання аж до їх розкриття протягом 14...36 діб.

- Запропоновано нову методику безконтактного контролю топографії поверхонь титанових сплавів після хіміко-термічної обробки. Встановлено величину змін шороховатості поверхні титану ВТ 1-0 після проведення хіміко-термічної обробки, зокрема азотування та борування.

**Практична значимість.** Робота виконувалася в рамках бюджетних наукових тем Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України: 2017–2019 рр. – “Моделювання і діагностика заповільненого руйнування матеріалів за локальної повзучості” № ДР 0117U000517, 2012–2016 рр. – “Побудова розв’язків задач теорії пружності та механіки руйнування для ортотропних тіл з кутовими вирізами” № ДР 0112U002778, 2017–2019 рр. – “Дослідження напружено-деформованого і граничного станів ізотропних та ортотропних тіл з кутовими вирізами і тріщинами за статичних та циклічних навантажень” № ДР III–124–17, 2015–2018 рр. – “Встановлення методами спекл-метрології та інтерферометрії деформаційних характеристик матеріалів для оцінювання параметрів їх руйнування з урахуванням локальних зон пружно-пластичного стану” № ДР 0113U000306, 2018–2021 рр. – “Розроблення технологій діагностування елементів конструкцій та локального руйнування засобами оптичної спекл-метрології, фазозсувної інтерферометрії та цифрової голографії” № ДР 0116U004952, 2019–2021 рр. – “Розроблення оптико-цифрових методів і систем контролю стану деформованої поверхні матеріалу під дією агресивних середовищ та змінних у часі навантажень” № ДР 0119U101182; у рамках міжнародного дослідницького проекту NUKR.SFPP 985055 “Розроблення новітніх методів для запобігання руйнувань трубопроводів задля безпеки” (Development of novel methods for the prevention of pipeline failures with security implications), 2016–2019 рр., за фінансової підтримки Програми НАТО «Наука заради миру та безпеки»; державного фонду фундаментальних досліджень “Розроблення інтерферометричної технології прогнозування місця старту втомної тріщини” № ДР 0018U006431 (2018 р.); проектами науково-дослідної роботи молодих учених НАН України: 2017–2018 рр. – “Розроблення методик оцінювання залишкового ресурсу елементів колісної пари локомотивів” № ДР 0117U001660, 2019–2020 рр. “Дослідження впливу різних концентрацій абсорбованого водню на топографію поверхні низьколегованих сталей у сірководневих середовищах” № ДР 0119U102521; науково-дослідної теми за Програмою НАН України “Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд” (“Ресурс 2”): проект Р. 7.11 “Розробка методологічних засад та регламентних документів для діагностування технічного стану і ремонту рам візків електровозів” № ДР 0117U000726 (2016 р.); госпдоговірних тем: 2015 р. – г/д “Розроблення методики оцінювання довговічності рами візка електровоза із врахуванням геометричних концентраторів механічних напружень” (№ 1378–ВГТ–36/15), 2016 р. – г/д “Методика оцінювання довговічності рами візка локомотива за наявності тріщин” (№ ВГТ–004/16/1451), 2017 р. – г/д “Створення методики розрахунку розподілу напружень біля концентраторів з певним радіусом

кривини” (№ 1481/ВГТ–022/16), 2018 р. – г/д “Методика розрахунку кінетики росту поверхневої тріщини на осі колісної пари із урахуванням складного напруженого стану” (№ 1581/ВГТ–001/17), 2018 р. – г/д “Методика визначення кінетики поширення втомної тріщини в осях колісних пар” (№ 1582/ВГТ–003/17).

Подана на конкурс робота складається з **42** праць, опублікованих з 2015 по 2021 рр. Серед них **36** статей, **1** монографія та **5** патентів на корисну модель. Зокрема, **28** статей опубліковані у міжнародних журналах (International Journal of Solids and Structures, Archives of Materials Science and Engineering, Lecture Notes in Civil Engineering, Procedia Structural Integrity, Journal of Mathematical Sciences, Optics and Lasers in Engineering, Optica Applicata, Information Extraction and Processing, Optical Engineering, Journal of Materials Engineering and Performance, Materials Science та інші) які реферуються у базі SCOPUS, загальний індекс цитування авторів **71**, загальний h-індекс дорівнює **9**.

Детально охарактеризуємо найважливіші здобутки роботи “Оптико-акустичне діагностування корозійно-механічного руйнування елементів конструкцій”:

### **Розроблення методик оцінювання залишкового ресурсу механічних елементів залізничного транспорту.**

**Ю.І. Канюком** створено математичні моделі втомного руйнування елементів конструкцій з тріщинами, зокрема механічних елементів залізничного транспорту, а також розроблено акустико-емісійну експрес-методику для виявлення зародження та розвитку під поверхневих та об’ємних тріщин в кільцях буксового підшипника [1]. Це дало змогу удосконалити технологію відбракування кілець у виробничих умовах під час проведення ремонту локомотивів.

Ним побудовано розрахункову модель поширення втомної макротріщини в тривимірному пружно-пластичному тілі за змішаного I+III макромеханізму руйнування [2]. Для побудови кінетичного рівняння, що описує даний процес застосовано перший закон термодинаміки та рівняння балансу швидкостей змін енергій [1, 2, 5]. Для практичного застосування сформульованої моделі для оцінювання залишкового ресурсу конструкційних металевих матеріалів із тріщинами, необхідно лише знати невідомі фізико-механічні характеристики досліджуваного матеріалу, які входять у рівняння, а саме статичну характеристику тріщиностійкості матеріалу  $K_{Ic}$ , AE метод визначення якої описаний у праці [1], та параметри  $a_i$ , які можуть бути визначені із експериментально побудованих кінетичних діаграм втомного руйнування методом найменших квадратів. Дана модель може бути використана при побудові методик розрахунку залишкового ресурсу металевих елементів конструкцій із втомними тріщинами, що розвиваються за змішаним I+III макромеханізмом.

Осі колісної пари – одні із найвідповідальніших елементів ходової частини залізничного транспорту. За останній час стрімко зросла кількість випадків їх втомного руйнування під час експлуатації вантажних вагонів. Тому Канюком Ю.І. запропоновано розрахункову методику оцінювання залишкової довговічності осі колісної пари вантажного вагона [3]. Кінетика росту втомної

поверхневої тріщини залежить не тільки від площі початкового тріщиноподібного дефекту, але й суттєво – від початкової конфігурації (співвідношення півосей контура  $a_0$ ,  $b_0$ ). Найнебезпечніші дефекти коли  $b_0/a_0$  приблизно дорівнює 0,8, оскільки за порівняно малої початкової глибини ( $b_0 \leq 2$  мм) можуть досягати критичного розміру приблизно через 20 000 км пробігу залізничного вагона, а зі збільшенням початкових розмірів таких тріщин суттєво знижується залишковий ресурс осі колісної пари.

У праці [7], показано, що спричинені вагою навантаженого залізничного вагона зсувні механічні напруження у поперечному перерізі шийки осі колісної пари можуть суттєво пришвидшувати ріст наявної на її поверхні поперечної втомної тріщини, знижуючи залишкову довговічність осі до 20%. Тому під час розрахунків залишкової довговічності осі колісної пари з тріщиною на поверхні її шийки, необхідно додатково враховувати вплив механізму поперечного зсуву на кінетику поширення втомної тріщини.

Канюк Ю.І. методом скінченних елементів розрахував розподіли механічних полів напружень та пружно-пластичних деформацій біля потенційних ділянок появи втомних дефектів у металі бандажа під час обтискання його притискного бурта обтискальним роликком вальцювального преса [4]. У результаті розрахунків отримали розподіл величини пластичної деформації у матеріалі бандажа під час обтискання. Встановлено, що внутрішній об'єм та, особливо, поверхневі і підповерхневі ділянки притискного бурта є потенційними місцями зародження небезпечних тріщиноподібних дефектів, які можуть розвиватись до критичних розмірів під час експлуатації бандажа. Тому перед експлуатацією доцільний додатковий неруйнівний контроль та технічна діагностика таких ділянок.

У працях [1, 8] розроблено АЕ-методику відбракування кілець буксового підшипника із виявленими внутрішніми тріщинами. Оцінювання якості кілець буксового підшипника з урахуванням АЕ-міри об'ємної пошкодженості дало змогу проводити їх навантаження у низькому діапазоні значень, що запобігає розвитку наявних макродефектів до розмірів більших, ніж допустимі, а також запобігти виникненню нових.

Експлуатаційний термін литих бокових рам візків вантажних вагонів близько 30 років. Однак на практиці вони частіше руйнуються за значно коротший термін і, згідно зі статистичними даними, найбільше – у перші 2–3 роки експлуатації. У праці [6] побудовано математичну модель росту втомної тріщини на поверхні бокової рами візка вагона із урахуванням стохастичної природи її навантаження. Виявлено залежність кінетики розвитку поверхневої тріщини від її початкової геометрії та знайдено для заданих умов навантаження форму півеліптичного контуру втомної тріщини, що із найбільшою швидкістю поширюється у глибину стінки рами.

**Застосування методу сингулярних інтегральних рівнянь для розрахунку напружено-деформованого стану композитів на основі теорії пружності квазіортотропного тіла.**

**А.Б. Чорненьким** отримано основні співвідношення плоскої задачі теорії пружності для квазіортотропного тіла [9, 10]. Квазіортотропним називають вироджений ортотропний матеріал, модуль зсуву якого пов'язаний з іншими

характеристиками матеріалу певною залежністю, що призводить до кратних коренів характеристичного рівняння. Це клас матеріалів, до якого належать також ізотропні тіла. Раніше виявлено, що відношення модулів пружності в ортотропному матеріалі є основним механічним параметром, тобто в багатьох випадках розподіл напружень в ортотропному та квазіортотропному матеріалах з таким самим відношенням головних модулів Юнга мало відрізняються між собою.

Проблема концентрації напружень біля отворів, вирізів і тріщин – одна з найважливіших у механіці деформівного твердого тіла. Першу основну задачу для площини з тріщинами зведено до сингулярних інтегральних рівнянь. Знайдено асимптотичний розподіл напружень біля вершини криволінійної тріщини. Проведено числові розрахунки коефіцієнтів інтенсивності напружень для прямолінійної та криволінійних тріщин і досліджено вплив на їх поведінку відношення основних модулів пружності матеріалу.

У механіці руйнування важливе значення мають дослідження поля напружень і переміщень в околі вершини гострого кутового вирізу. Через степеневу особливість складно знаходити числові розв'язки крайових задач теорії пружності для областей з негладкою межею. Чорненьким А.Б. отримано розв'язки задач на власні значення для квазіортотропного клина. Побудовано відповідні розв'язки для квазіортотропної площини з кутовим закругленим вирізом. Знайдено залежності між коефіцієнтами інтенсивності та концентрації напружень у гострій та заокругленій вершинах кутового вирізу в квазіортотропній площині. На цій основі методом суперпозиції отримано коефіцієнти інтенсивності напружень у кутовій вершині дволанкової ламаної тріщини.

У загальному випадку багатозв'язної області крайові задачі можуть бути розв'язані методом інтегральних рівнянь різного типу. Особливо ефективним метод інтегральних рівнянь виявився для пружних областей з гладкою межею. Побудовано систему сингулярних інтегральних рівнянь першої основної задачі плоскої теорії пружності для квазіортотропного тіла, що містить отвори та тріщини [11, 12].

Чорненьким А. Б. досліджено також плоску періодичну задачу теорії пружності для квазіортотропної площини з нескінченним рядом близько розміщених криволінійних отворів (фізичні щілини, еліптичні та ромбічні отвори) [13, 14]. Для близько розміщених отворів властива велика концентрація напружень на їх контурах. У зв'язку з тим виникають значні труднощі обчислювального характеру при дослідженні розподілу напружень. Сучасні комп'ютери та нові числові методи розв'язування інтегральних рівнянь дають змогу числовим шляхом визначити порядок особливості максимальних напружень і знайти числовий коефіцієнт при цій особливості для отворів різної конфігурації та малих віддалей між ними. Знання особливості напружень має важливе значення у розробці прямих числових методів розв'язування подібних задач. Такі дослідження можна використати також для отримання числових розв'язків нових задач за допомогою граничних переходів. Знайдено коефіцієнти інтенсивності та концентрації напружень у гострих та закруглених вершинах отворів у квазіортотропній площині за одновісного розтягу. За допомогою граничного переходу, коли отвори наближаються один до одного,

отримано коефіцієнти інтенсивності та концентрації напружень у гострих та закруглених вершинах двобічних вирізів у квазіортотропній площині.

Виходячи з періодичної системи криволінійних тріщин, максимально наблизивши їх одна до одної, площина розрізається на верхню та нижню півплощини з криволінійними краями. Досліджено періодичну задачу теорії пружності для квазіортотропної півплощини з криволінійним краєм періодичної форми [15]. Знайдено коефіцієнти концентрації напружень у вершинах синусоїдного, U-подібного, та закругленого кутового вирізів у квазіортотропній півплощині за одновісного розтягу на нескінченності. Обчислено коефіцієнти інтенсивності напружень у гострих вершинах крайових кутових вирізів у квазіортотропній півплощині залежно від кута розхилу вирізу.

### **Розроблення моделей для визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій з врахуванням їх деградації з часом та впливу корозійних середовищ.**

**І.П. Штойком** розроблено теоретичні основи методу для визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій з тріщинами за дії довготривалих циклічних навантажень і водневмісних середовищ. Застосування методу продемонстровано на задачі про визначення залишкового ресурсу труби газопроводу за циклічної зміни тиску і наводнювання стінки в результаті дисоціації на її поверхні природного газу. При цьому показано, що неврахування наводнювання труби газопроводу може призвести до значних помилок при визначенні її залишкового ресурсу, яке може спричинити непередбачене руйнування [20, 24, 25, 27].

Запропонована розрахункова модель для визначення залишкового ресурсу труби нафтопроводу з зовнішньою поверхневою корозійно-механічною тріщиною за ламінарного потоку нафти і багаторазових гідроударів. В основу моделі покладено енергетичний підхід для дослідження заповільненого поширення тріщин, моделі прикладання імпульсних навантажень і основні механізми поширення корозійно-механічної тріщини. З допомогою даної моделі досліджено залежність залишкового ресурсу труби нафтопроводу із сталі Х60 від кількості гідроударів в ній [22, 23, 26].

Розроблена розрахункова модель для визначення розподілу концентрації водню в компактному зразку за електролітичного наводнювання. Зразок змодельовано паралелепіпедом, протилежна до вершини тріщини поверхня якого на певну глибину занурена в електроліт, з допомогою рівняння Фіка з початковими і граничними умовами. На зануреній поверхні задано постійну концентрацію водню, а на іншій – нульову. Модель реалізовано методом скінченних елементів і визначено розподіл концентрації водню в паралелепіпеді за геометрією і часом [18, 29].

Запропоновано низку математичних моделей і розрахункових методів для визначення залишкового ресурсу магістральних трубопроводів з поверхневими тріщинами та врахуванням дії на них низки силових і фізико-хімічних факторів, зокрема, дії довготривалого постійного тиску газу в газопроводах та змінного в нафтопроводах, маневрового режиму навантаження, гідроударів, наводнювання труб з транспортованого газу, одночасного впливу наводнювальних і корозивних середовищ, деградації матеріалів труб впродовж їх експлуатації.



Для визначення залишкового ресурсу труб застосовано енергетичний підхід. Побудовано відповідні розрахункові моделі (диференціальні рівняння з початковими та кінцевими умовами). Для конкретних матеріалів труб (сталі X52, X60, X70) розраховано залишковий ресурс за довготривалого статичного та змінного в часі навантаження, наводнювання, ґрунтової корозії, а також з урахуванням деградації матеріалів впродовж 30 років. Враховано зміну в часі експлуатації характеристик тріщиностійкості як найчутливіших до зміни стану металу. Показано, що деградація матеріалу впродовж експлуатації трубопроводу значно зменшує його залишковий ресурс [16, 17, 19, 21, 28].

### **Розроблення методики відтворення рельєфу поверхні для моніторингу та оцінки руйнування матеріалу під дією робочих середовищ.**

**І.В. Стасишином** було розроблено метод дистанційного відтворення рельєфу поверхонь за використання трикрокової фазозсувної інтерферометрії з довільним зсувом фази опорного променя [30, 31, 32]. Даний метод дозволяє в часі наближеному до реального, реєструвати інтерферограми поверхонь та проводити процедуру розгортання фази. Для виділення компонент рельєфу з отриманої фази відбувався підбір оптимальних параметрів фільтру [33], для відтворення рельєфу поверхні відповідно нормативних документів [34].

Запропонований метод разом з відповідним обладнанням застосовувався під час моніторингу та контролю поверхні спеціальних зразків, що виготовлялися з різних металів і сплавів, та зазнавали циклічних навантажень або впливу робочих середовищ. Такий моніторинг дає можливість визначити найбільш вразливі місця деталі та оцінити її залишковий ресурс [35].

Одним з найменш вивчених процесів механіки руйнування залишається втомне руйнування. Під час циклічних навантажень різних металів їх поведінка (реакція) відрізняється [36]. Ця відмінність пов'язана з їх початковою пластичністю. Втомному руйнуванню притаманне накопичення ушкоджень. За досягнення критичного рівня цих ушкоджень виникає макротріщина, що передує руйнуванню матеріалу в цілому. Поступове накопичення ушкоджень матеріалу викликає зміну шорсткості поверхні. Проте ця зміна є різною на різних ділянках поверхні деталі [37]. Найбільші зміни шорсткості поверхні спостерігаються в околі концентратора напружень та зменшуються з віддаленням від нього. Додатковий аналіз цієї шорсткості [38] дозволив визначити місця зародження втомних тріщин в околі концентратора напружень до її появи.

Окрім втомного руйнування даний метод був використаний для вивчення поведінки сталей з різною структурою. Під час моніторингу різних сталей після дії на них водню було встановлено, що на їх поверхні утворюються блістери з діаметром 0,8...1,5 мкм [39], проте густина цих утворень залежить від матеріалу. Подальші дослідження показали, що зміни поверхні, які викликані дією водню, тривають значно довше, ніж представлено в літературних даних, а саме 13...36 діб [40]. Знаючи поведінку сталі у водневому середовищі можна підбирати матеріал, який здатний найбільш ефективно в ньому працювати.

Моніторинг приросту висотних параметрів шорсткості поверхні деталі після хіміко-термічної обробки дає змогу прогнозувати її корозійні, втомні та трибологічні властивості і розробляти рекомендації для їх покращення [41].

Комбінація асиметрії та ексцесу доповнює уявлення про мікрогеометрію борованої поверхні титану. Утворення низьких широких вершин та глибоких впадин повинно сприяти кращій здатності утримувати поверхнею мастило та чинити менший питомий тиск на плями фактичного контактування під час тертя [42]. До того ж, що менша висота виступів, то менші втрати матеріалів мастила і деталей під час їх припасування (малий об'єм зношеного матеріалу) та вища корозійна тривкість.

Отримані у роботі результати відповідають сучасному рівню світових досягнень у галузі механіки деформівного твердого тіла, що підтверджено публікаціями у провідних наукових журналах України та зарубіжжя. Вони мають впровадження на ПрАТ “Львівський локомотиворемонтний завод”, УМГ «Львівтрансгаз» ПАТ «Укртрансгаз», ТОВ «Укрспецмаш» і дали значний економічний ефект.

**Висновки.** Підсумовуючи результати досліджень, можна стверджувати, що в роботі “Оптико-акустичне діагностування корозійно-механічного руйнування елементів конструкцій” представлено розроблені методи та підходи для діагностування стану та визначення залишкової довговічності елементів конструкцій. Низка результатів роботи отримана вперше і активно пропагується учасниками авторського колективу на міжнародних і вітчизняних наукових конференціях, з’їздах і симпозіумах.

Претенденти:

кандидат технічних наук,  
науковий співробітник  
відділу акустичних методів та засобів  
технічної діагностики  
ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України

Ю. І. Канюк

кандидат фізико-математичних наук,  
науковий співробітник  
відділу теоретичних основ механіки руйнування  
ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України

А. Б. Чорненький

кандидат технічних наук,  
молодший науковий співробітник  
відділу діагностики корозійно-водневої  
деградації матеріалів  
ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України

І. П. Штойко

молодший науковий співробітник  
відділу теорії хвильових процесів та  
оптичних систем діагностики  
ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України

І. В. Стасишин