

ВІДГУК

**офіційного опонента на дисертаційну роботу
Долінської Ірини Ярославівни**

"ДІАГНОСТУВАННЯ РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ І ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ЛОКАЛЬНОЇ ПОВЗУЧОСТІ",

**подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій.**

За результатами вивчення дисертації Долінської І.Я., яка є науковою роботою, що подана у вигляді рукопису і складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків, розгляду автореферату та ознайомлення з опублікованими працями здобувача за темою дисертації, необхідно зазначити таке:

Актуальність теми дисертації

Дослідження в області механіки руйнування показують, що втрата міцності і вичерпання довговічності елементів конструкцій проходить шляхом зародження і поширення тріщин. Під дією довготривалих статичних навантажень це призводить до зародження і поширення тріщин повзучості. Так руйнуються елементи конструкцій теплової і атомної енергетики, хімічної і нафтохімічної промисловості, а також інших областей сучасної техніки, де їх експлуатація проходить за довготривалих статичних навантажень. Тому розробка методів для визначення довговічності таких елементів конструкцій з тріщинами при довготривалих статичних навантаженнях в умовах високих температур має важливе значення для інженерної практики.

Оцінці залишкової довговічності елементів конструкцій за наявності тріщин і дії довготривалих статичних навантаженнях в умовах високих температур, коли в зоні передруйнування біля контуру тріщини реалізуються механізми високотемпературної повзучості, присвячено відносно мало наукових праць. Експериментальних досліджень у зв'язку з їх технічними трудностями і великими часами проведення відомо також не дуже багато. Теоретичні дослідження із встановлення розрахункових моделей для визначення залишкової довговічності елементів конструкцій з дефектами типу тріщин розвинуті не достатньо.

У даній дисертаційній роботі такі задачі розв'язуються ефективно. Тут формулюється розрахункова модель для визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій з тріщинами під дією довготривалих навантажень, високих температур і різних фізико-хімічних факторів (водневмісне середовища, корозійно агресивні середовища, радіаційне опромінення). Поряд з цим у даній роботі на основі сформульованого загального енергетичного підходу вперше побудовано математичні моделі (кінетичні рівняння з відповідними умовами) для

дослідження заповільненого руйнування матеріалів і елементів конструкцій через параметри АЕ, яка їх супроводжує.

Загальна характеристика роботи

Дослідження за темою дисертації виконувалися у відділі акустичних методів технічної діагностики Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України у рамках держбюджетних наукових тем за відомчим замовленням НАН України: “Дослідження особливостей наводнення та концентрації водню на параметри магнетопружної акустичної емісії” (2011–2013, № держреєстрації 0111U002378), “Дослідження впливу деградування магнетом'яких матеріалів на зміну параметрів магнетопружної акустичної емісії” (2014–2016, 0114U004006), “Моделювання і діагностика заповільненого руйнування матеріалів за локальної повзучості” (2017–2019, 0117U000517), а також господоговірних тем: “Розрахунок залишкового ресурсу рами візка локомотива за наявністю втомних тріщин та тріщин повзучості” (2013, № В–21–13/1203), “Розроблення методики оцінювання довговічності рами візка електровоза із врахуванням геометричних концентраторів механічних напружень” (2015, № 1378–ВГТ–36/15), “Розроблення методики оцінювання довговічності рами візка локомотива за наявності тріщин” (2016, № ВГТ–004/16/1451), “Акустико-емісійне діагностування обладнання нафтопомпувальних станцій” (2013, № 693), “Розроблення рекомендацій щодо ремонту етиленопроводу “Калуш-Західний кордон” (2016, № А201602680/1445), дисертант-виконавець. Зміст автoreферату відповідає основним положенням дисертації.

Дисертаційна робота складається із вступу, сім розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми досліджень, визначено мету і задачі досліджень, показано зв'язок із науковими програмами, планами, темами, висвітлено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів. Визначено особистий внесок здобувача у публікаціях та рівень апробації результатів дисертації.

У *першому розділі* подано огляд робіт, присвячених дослідженню та діагностуванню заповільненого руйнування матеріалів і елементів конструкцій за дії силових та фізико-хімічних чинників методами механіки руйнування і акустичної емісії. На основі аналізу і синтезу результатів цих робіт встановлено, що багато важливих питань в механіці заповільненого руйнування є недостатньо дослідженими. Зокрема, не побудований загальний енергетичний підхід для дослідження заповільненого руйнування, який би охоплював такі його параметри як довготривале статичне і змінне в часі навантаження з витримкою в циклі, високу температуру, воденьвмісне та корозивне середовища, нейтронне опромінення, маневровий режим зміни навантаження. Це дало б можливість визначати залишковий ресурс елементів конструкцій за дії на конструкційні матеріали згаданих чинників. Не були розроблені також моделі аналітичного опису заповільненого руйнування матеріалів через параметри сигналів АЕ. У даній дисертаційній роботі сформульований такий підхід, на основі якого

розроблено низку розрахункових моделей для дослідження і АЕ-діагностування заповільненого руйнування.

У другому розділі дисертації розроблено загальний енергетичний підхід для діагностики кінетики і періоду докритичного росту тріщин за довготривалого навантаження і дії фізико-хімічних чинників. В його основу покладено перший закон термодинаміки про енергетичний баланс енергетичних складових і баланс швидкостей їх змін для елементарного акту поширення тріщини (стрибка тріщини) за довготривалого навантаження. Узагальнено відому в літературі розрахункову модель визначення періоду докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості на випадок плоских тріщин з довільним контуром в тривимірних тілах за статичного навантаження в умовах дії високих температур.

На основі енергетичного підходу розроблено математичну модель для визначення впливу вібрації (малі амплітуди навантаження з високою частотою) на високотемпературну повзучість, моделюючи сумісну дію вібрації і статичного розтягу за високої температури як блочне навантаження, яке складається з хвиль вібрації та періоду усталеної повзучості. При цьому встановлено, що вібрація зменшує в даному випадку залишкову довговічність пластини за її довготривалого статичного розтягу до трьох разів.

Третій розділ присвячений розробленню математичних моделей оцінювання впливу робочого середовища (воденьвмісного і корозійного), нейтронного опромінювання на довговічність, зокрема на залишкову довговічність елементів конструкцій, які працюють за довготривалих статичних і змінних у часі навантажень. Виведені співвідношення для оцінення впливу водню на ресурс пластини зі сталі 321 з двома боковими вирізами під дією циклічного навантаження з витримкою в циклі. Показано негативний вплив водню на повзучість матеріалів, що призводить до значного (може бути на порядок) зменшення довговічності пластини. Побудовано також математичну модель для визначення періоду докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості за нейтронного опромінення. Автором запропоновано розрахункову модель для визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій з тріщинами високотемпературної повзучості за маневрового режиму експлуатації і дії воденьвмісного і корозивного середовищ.

У четвертому розділі дисертації побудовані математичні моделі аналітичного опису кінетики поширення тріщин у матеріалах і елементах конструкцій за дії силових і фізико-хімічних чинників методом акустичної емісії. Розглянуто ріст тріщин повзучості, воднево-механічних та корозійних тріщин. Розв'язано задачу про визначення періоду докритичного росту плоскої кругової воднево-механічної тріщини в тривимірному тілі, яке піддане дії воденьвмісного середовища і розтягується зовнішніми статичними зусиллями через параметри АЕ. При цьому на основі сформульованого в другому розділі енергетичного підходу побудовано розрахункову модель визначення періоду докритичного росту воднево-механічної тріщини через параметри КІН.

Поряд з цим у даному розділі побудовано розрахункові моделі визначення періоду докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості в середовищі водню і корозійно-механічних тріщин через параметри АЕ.

У *п'ятому розділі* дисертації запропоновано акустико-емісійну методику для побудови кінетичних діаграм поширення тріщин за довготривалого статичного навантаження і впливу фізико-хімічних чинників. Щоб визначити залишковий ресурс елементів конструкцій з тріщинами потрібно мати кінетичні діаграми росту тріщин, тобто залежності швидкості росту тріщини від КІН, $V-KI$. Однак, як показує експериментальна практика, механічним способом таку кінетичну діаграму важко побудувати, особливо першу ділянку за малих параметрів навантаження, оскільки це довготривалий процес. Адаптувавши кінетичне рівняння на випадок поширення тріщин у компактному зразку, розроблено АЕ-методику побудови кінетичної діаграми росту воднево-механічних тріщин з урахуванням показів на хвилеводі.

У *шостому розділі*, розроблені в попередніх розділах розрахункові моделі, адаптовані для діагностиування і оцінювання залишкового ресурсу біметалевих матеріалів, зокрема двошарових пластин з наскрізними, внутрішніми та поверхневими тріщинами високотемпературної повзучості, а також втомними тріщинами. У розділі розроблено математичну модель, яку узагальнено на випадок поширення систем тріщин високотемпературної повзучості в двошарових пластинах. Розглянуто конкретні випадки періодичної і двояко періодичної систем тріщин. Аналогічно до вище наведеної методики розроблено розрахункові моделі для дослідження кінетики і періоду докритичного росту втомних тріщин у біметалевих пластинах, що дало змогу розрахувати залишковий ресурс двошарової і двокомпонентної пластин з поверхневою і наскрізною тріщинами. Поряд з цим у розділі 6, як двошаровий елемент, розглянуто корпус реактора гідрокрекінгу нафти з наплавкою, досліджуючи відшарування на межі сплавлення за допомогою методу АЕ. Як показують результати наведених в літературі експериментальних досліджень відшарування відбувається внаслідок утворення і поширення водневих тріщин. На основі концепції методу АЕ зроблено адаптацію цього вище згаданого диференціального рівняння для аналітичного опису водневого руйнування. В результаті отримано нове диференціальне рівняння для визначення кінетики зміни площини $S(t)$ водневої тріщини через параметри АЕ (амплітуду, подій) і надвисокої концентрації водню.

У *сьомому розділі* дисертації оцінено залишковий ресурс (період докритичного росту тріщин) деяких елементів енергетичного обладнання, зокрема колеса парової турбіни, труби паропроводу з урахуванням наводнювання її стінки, визначено кінетику зміни тріщини в корпусі реактора ВВЕР.

Розроблений енергетичний підхід дав можливість побудувати модель (див. розділ 3), яка є коректною для повного діапазону кількості змін навантаження. Це показано на прикладі задачі про визначення залишкової довговічності диска парової турбіни з прямолінійною тріщиною за маневрового режиму зміни навантаження. Поряд з цим оцінено залишкову довговічність труби паропроводу з

тріщиною з урахуванням наводнювання її стінки в результаті дисоціації на ній пари за високої температури і маневрового режиму експлуатації.

У даному розділі також спрогнозовано кінетику поширення поверхневої тріщини в корпусі реактора типу ВВЕР-1000. Показано, що початкова тріщина під час продовження терміну експлуатації сягне небезпечних розмірів, що може привести до руйнування корпусу реактора. Тому під час продовження терміну експлуатації реакторів важливо провести діагностику внутрішньо корпусного устаткування на наявність у ньому дефектів типу тріщин.

У *додатах* до дисертаційної роботи наведено акти впровадження результатів роботи.

Основні наукові результати досліджень та наукова новизна дисертації.

Подана дисертаційна робота визначається науковою новизною, яка полягає в тому, що в ній:

1. Вперше отримано розрахункові моделі для діагностування параметрів заповільненого руйнування матеріалів і елементів конструкцій за параметрами сигналів АЕ.
2. Узагальнено математичну модель визначення періоду докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості на випадок плоских тріщин з довільним контуром у тривимірних тілах за довготривалого статичного навантаження.
3. Вперше розроблено математичну модель для визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій з тріщинами за дії блочного навантаження з локальною повзучістю.
4. Отримано розрахункову модель для визначення ресурсу елементів конструкцій, які перебувають під дією воденьвмісного середовища за дії циклічного з витримкою в циклі навантаження і високих температур.
5. Розроблено нові розрахункові моделі для оцінювання впливу корозивного середовища та нейтронного опромінення на докритичний ріст тріщин повзучості (залишкового ресурсу) в елементах конструкцій в умовах підвищених температур.
6. Вперше побудовано розрахункові моделі для оцінювання впливу корозивно-наводнювальних середовищ на період докритичного росту тріщин високотемпературної повзучості в елементах конструкцій за їх маневрового режиму навантаження.
7. Зроблено нові постановки задач і здійснений їх наближений розв'язок для визначення залишкового ресурсу труби парогону за наводнювання її стінки, а також колеса парової турбіни за маневрового режиму їх експлуатації. Отримані результати дають можливість більш ефективно прогнозувати залишковий ресурс елементів енергетичного обладнання в реальних умовах експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що вони становлять основу інженерних методів для діагностування і оцінювання залишкового ресурсу елементів конструкцій

довготривалого навантаження з урахуванням дії фізико-хімічних факторів середовищ їх експлуатування.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечені першим законом термодинаміки, критеріями механіки руйнування квазікрихких матеріалів, основними положеннями фізико-хімічної механіки руйнування, числовими методами розв'язання диференціальних рівнянь, методом акустичної емісії, окремими положеннями фізики твердого тіла.

Повнота викладу результатів дисертацій в опублікованих працях. Основні результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлено у 47 наукових праць, серед яких 2 монографії, 1 навчальний посібник, 1 стандарт організації України, 28 статей у наукових фахових виданнях України та у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 18 у виданнях, що входять у наукометричні бази даних Web of Science та Scopus), 15 у матеріалах і тезах доповідей міжнародних і вітчизняних конференцій.

Апробація результатів дисертацій. Матеріали дисертації доповідались й обговорювалися на більш ніж 15 міжнародних і національних науково-технічних конференціях та семінарах.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації. Оформлення автореферату за своїм обсягом, структурою та змістом відповідає чинним вимогам до оформлення дисертаційних робіт. Основний зміст автореферату ідентичний змісту основних положень дисертації.

Зауваження по дисертаційній роботі і автореферату

1. В роботі розглядається загальний енергетичний підхід для визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за дії різних силових і фізико-хімічних факторів (довготривале статичне, циклічне і блочне навантаження, корозійно агресивні середовища, водневмісне середовище, нейтронне опромінення). Вплив кожного середовища розглядається окремо. Але відомо, що коли такі середовища діють колективно одночасно, то відбувається їх взаємовплив. Як визначається такий взаємовплив в роботі не приведено.
2. За дії циклічного навантаження з витримкою в циклі і повзучості зона передруйнування біля вершини тріщини перебуває в умовах розтягу і стиску. Як при цьому відбувається її наводнення? В роботі це не зазначено.
3. При формулюванні математичних моделей для визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за дії фізико-хімічних факторів і локальної повзучості застосовується енергетичний підхід із використанням деформаційної моделі Леонова-Панасюка –Дагдейла. До цих пір розв'язок задачі коректний для будь-яких розмірів тріщин. А на прикладах застосування цих моделей дисертантка використовує підхід лінійної механіки руйнування в параметрах КІН, не вказуючи для яких розмірів тріщин це коректно.
4. У задачах із визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за маневрового режиму навантаження періоди зміни навантаження фіксуються не за часом, а за зміною розміру тріщини, що практично

утруднено. Для практичних цілей було б доцільніше ці періоди зміни фіксувати за часовим фактором.

5. При визначенні залишкового ресурсу елементів конструкцій за дії довготривалого навантаження, високої температури, корозійного середовища і локальної повзучості розглядається тільки електрохімічна корозія і нехтується анодним розчиненням у вершині тріщини. Як будуть використовуватися сформульовані моделі за інших типів корозій і яка похибка в результаті розв'язку задач від нехтуванням величини анодного розчинення у вершині тріщини в роботі не приводиться.

Загальні висновки

Вищевказані зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного дисертаційного дослідження, не зменшують її наукову новизну та практичну значимість і не знижують загального позитивного сприйняття проведеного обсягу досліджень.

Вважаю, що дисертаційна робота І. Я. Долінської "Діагностування руйнування матеріалів і визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за локальної повзучості", яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій, є завершеною науковою працею, в якій вирішено нову науково-технічну проблему, яка полягає у формульованні розрахункових моделей і розробленні на цій основі методів визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за дії силових і фізико-хімічних факторів, а також діагностування стану їх матеріалу і дефектності методом акустичної емісії.

Дисертаційна робота відповідає вимогам паспорту наукової спеціальності 05.02.10 – діагностика матеріалів і конструкцій, а також вимогам пунктів щодо "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19 серпня 2015 р., а її автор, **Ірина Ярославівна Долінська**, заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за обраною спеціальністю.

Офіційний опонент,
завідувач відділу механіки конструкційних
матеріалів Інституту проблем міцності
імені Г. С. Пісаренка Національної академії
наук України, доктор технічних наук, професор

М.К. Кучер

Підпис зав. відділом М.К. Кучера засвідчує:

Учений секретар Інституту проблем міцності
імені Г.С. Пісаренка НАН України



В.І. Скрипченко