

681.518
Г12

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Габльовська Надія Ярославівна

УДК 681.325

**СИСТЕМА КОНТРОЛЮ РОЗВИТКУ МІКРОТРІЩИН У НАПРУЖЕНО-
ДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛІЧНИХ КОНСТРУКЦІЯХ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ - 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Чеховський Степан Андрійович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
завідувач кафедри інформаційно-вимірвальної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Копей Богдан Володимирович
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
професор кафедри нафтогазового обладнання

Доктор фізико-математичних наук, професор
Сопролюк Федір Олексійович,
Чернівецький національний університет
ім. Ю.Федьковича, завідувач кафедри
математичних проблем
управління і кібернетики



Захист відбу
Д 20.052.03 і
м.Івано-Фра

З дисертації
університету

Автореферат

ованої вченої ради
фти і газу (76019,

льного технічного

Вчений секре

чук М.М.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан парку металоконструкцій і обладнання, що експлуатується тривалий час, характеризується значним їх зносом через неможливість, у ряді випадків, оновлення технологічного обладнання. Такі особливості накладають відповідні вимоги щодо експертизи та діагностики металів ще працездатного обладнання з метою оцінки їх стану незалежно від терміну служби.

Спроби зниження аварійності за рахунок зростаючих діагностичних процедур з метою виявлення утворених дефектів не дозволили зменшити експлуатаційну аварійність навіть за масового експлуатаційного контролю металоконструкцій. Незважаючи на ряд нових приладів та систем для проведення дефектоскопії, що з'явилися з 90-х років минулого сторіччя, а також на висококваліфікований контингент спеціалістів в галузі діагностики, підняти рівень безаварійності поки ще не вдалося.

Отже, відповідна точність підсумкової оцінки і побудованого на її результатах діагностичного прогнозу зосереджена саме в нових методах та засобах контролю, що можуть стати ефективними стосовно контролю металоконструкцій, які знаходяться в значній ступені втоми, але за своїми фізико-механічними і геометричними характеристиками, ще не вийшли за межі встановлених нормативних значень і не мають дефектів типу порушення суцільності структури матеріалу металоконструкції.

В реальних умовах експлуатації більшість металоконструкцій піддаються силовому впливу, тобто перебувають у напружено-деформованому стані, що в подальшому призводить до утворення дефектів, які з достатньою точністю можна виявляти методами неруйнівного контролю. Передумовою дефектоутворення є зміна фізичних та механічних характеристик матеріалу конструкцій, організація контролю яких потребує значних матеріальних затрат. Результати такого контролю є багатопараметричними та малоінформативними в плані прийняття рішення щодо реального стану металу конструкції.

Отже, задача розробки методів та засобів опосередкованого контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій, що дозволяють за мінімальною кількістю інформативних параметрів виявляти момент зародження мікрodefektів та контролювати їх розвиток, є важливою і актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи є частиною планової науково-дослідної програми з розвитку нафтопромислового комплексу України і базується на результатах держбюджетної науково-дослідної роботи Д-4-Ф "Метрологія і вимірвальна техніка в нафтогазовій галузі та приладобудуванні" (номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №0101U001664) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Працюючи на посаді молодшого наукового співробітника, автор була виконавцем розділу, присвяченому розробці методу та засобу контролю зародження та розвитку мікротріщин в конструкціях, що перебувають у напружено-деформованому стані.

Мета роботи і задачі дослідження. Метою роботи є вдосконалення методу та створення системи контролю зародження та розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях.

Для реалізації даної мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити наступні задачі:

1) проаналізувати існуючі методи та засоби контролю процесу зародження та розвитку мікротріщин, застосування яких дозволять здійснювати такий контроль в напружено – деформованих конструкціях;

2) дослідити зміни енергетичних процесів, що виникають під час структурних перетворень у металах конструкції, яка перебуває у напружено-деформованому стані. Встановити інформативний параметр, що характеризує процес зародження мікротріщини;

3) побудувати і програмно реалізувати математичну термодинамічну модель, котра дозволить за зміною температури на поверхні металічної напружено-деформованої конструкції оцінювати зародження та розвиток мікротріщини. Провести експериментальні дослідження на підтвердження одержаних залежностей інформативного параметра від глибини залягання мікротріщин;

4) провести модельне оцінювання універсальних залежностей між параметрами, що описують структурні перетворення під час зародження, накопичення та розвитку мікротріщин, в тому числі від прикладеного навантаження.

5) розробити систему контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях та визначити її основні метрологічні характеристики;

6) розробити програмне забезпечення системи контролю для оцінки розвитку мікротріщин.

Об'єкт дослідження - внутрішня структура металічних конструкцій, у тому числі дефекти цієї структури, та зміни енергетичних процесів, що виникають під час структурних перетворень у металах конструкції, яка перебуває у напружено-деформованому стані.

Предмет дослідження – методи і алгоритми контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях нафтогазового обладнання.

Методи дослідження базуються на теорії обробки сигналів, фрактальної та аналітичної геометрії. Під час розв'язання поставлених задач використовувались методи статистичного аналізу, математичного моделювання, теорії похибок.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі отримано наступні наукові результати:

- удосконалено і реалізовано метод контролю моменту зародження та розвитку мікротріщин в металоконструкціях, що перебувають у напружено-деформованому стані, з використанням температурних змін як інформативного параметра;

- дістала подальший розвиток теорія взаємозв'язку між мікро– і макрохарактеристиками металів з використанням фрактальної механіки руйнувань та синергетичної моделі руйнування твердого тіла;

- вперше одержано математичну термодинамічну модель, яка дозволяє оцінювати зміну температури на поверхні металічної напружено-деформованої конструкції в момент зародження та розвитку мікротріщин.

Практичне значення одержаних результатів. Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили отримати наступні практичні результати:

- в результаті математичного моделювання отримано залежності, які можуть бути використані для знаходження глибини залягання мікротріщини у зоні концентраторів напружень;

- розроблено засіб для вимірювання температури, котрий дозволяє контролювати зміну температури на поверхні твердого тіла в момент зародження мікротріщини;

- розроблено систему контролю, що дозволяє контролювати розвиток мікротріщини в залежності від матеріалу конструкції та його геометричних розмірів;

- одержані практичні результати впроваджено у ВАТ "Івано-Франківський арматурний завод", ВКФ "Інтеп" та у навчальний процес Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу на кафедрі інформаційно-вимірювальної техніки у курсі "Технологічні вимірювання та прилади у нафтовій та газовій промисловості" і на кафедрі електротехніки у курсі "Електротехнічні та конструкційні матеріали".

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах в співавторстві участь здобувача є визначальною, зокрема, автором проаналізовано методи контролю внутрішньої структури об'єкту з використанням фрактального підходу [1, 8], проаналізовано і встановлено, що основним інформативним параметром для контролю зародження мікротріщин є температура, що дозволило створити макет технічного засобу контролю зміни температури на поверхні об'єкта контролю [6], розроблено систему контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях і досліджено її метрологічні характеристики [10], проведено експериментальні дослідження, результати яких використано при розробці термодинамічної моделі, зокрема оцінки її ефективності [5]. Всі експериментальні дані, що включено в дисертаційну роботу, одержані безпосередньо автором. Аналіз літературних джерел, розробка та реалізація практичних схем контролю зміни температури на поверхні об'єкта контролю, програмна реалізація алгоритму, формулювання основних висновків дисертаційної роботи проведено дисертантом самостійно.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Матеріали дисертації представлено на науково-технічній конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах" (м. Хмельницький, 28 травня - 30 травня 2002 р.); на другій науково-технічній конференції "Приладобудування 2003: стан і перспективи" (м. Київ, 22-23 квітня 2003р.); на третій науково-технічній конференції "Приладобудування 2004: стан і перспективи" (м. Київ, 20-21 квітня 2004р.); на четвертій науково-технічній конференції "Приладобудування 2005: стан і перспективи" (м. Київ, 26-27 квітня 2005р.); на п'ятій науково-технічній конференції "Приладобудування 2006: стан і перспективи" (м. Київ, 25-26 квітня 2006р.); на конференції "Метрологія та вимірювання" (м. Харків, 10-12 жовтня 2006р.), на четвертій науково-практичній конференції "Vědecký průmysl evropského kontinentu - 2007" (м. Прага, 01-15 грудня 2007р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 12 робіт (в тому числі 7 одноособових), з них 5 - у фахових виданнях, 7 - у збірниках наукових праць і тез доповідей науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків і містить 148 сторінок, 42 рисунків, 6 таблиць, 11 додатків. Список використаних джерел містить 126 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, викладено основні положення проблеми, яка розглядається, сформульовані мета та завдання дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі проаналізовано та систематизовано літературні дані стосовно фактичного технічного стану металоконструкцій, зокрема об'єктів нафтогазовидобувної промисловості, умов їх експлуатації, методів контролю утворених дефектів (мікротріщин) і визначення змін фізико-механічних характеристик, вивчення механізмів і здійснення кількісної оцінки процесів зародження та розвитку мікротріщин в матеріалах конструкцій, що перебувають у напружено-деформованому стані.

Особливі вимоги висуваються до експлуатаційної надійності нафтогазового обладнання та інструменту, які тривалий час експлуатуються у досить складних умовах: значні статичні та динамічні навантаження, корозійно-агресивні середовища, суттєві перепади тисків та температур. Стан, у якому перебувають металічні конструкції під час експлуатації, можна охарактеризувати як напружено-деформований, що супроводжується зміною фізико – механічних характеристик металу та геометричних параметрів окремих елементів конструкції. Визначення цих характеристик існуючими методами контролю дозволяє оцінити технічний стан даної конструкції.

Показано, що методи контролю утворених дефектів відіграють суттєву роль при визначенні довговічності конструкцій лише на кінцевих стадіях експлуатації металу, коли мікродфекти структури вже сформувалися, починають зливатись і утворювати макродефекти, доступні для виявлення дефектоскопами.

Утворення дефектів з найбільшою імовірністю виникають у задалегідь визначених на стадії конструювання металічної конструкції локальних областях – зонах концентрації напружень. В околі цих локальних областей виникають, розвиваються і накопичуються зміни структури металу, які у процесі експлуатації призводять до зародження мікродфектів. Швидкість розвитку цих процесів, у загальному випадку, визначається величиною і тривалістю навантаження.

Ранній період зміни стану матеріалу, так званий переддефектний стан, характеризується, в першу чергу, просторовим розподілом його фізичних та механічних характеристик, зміна яких є інформативними параметрами для контролю зародження мікротріщин. Більшість методів неруйнівного контролю, що дозволяють виявляти і прогнозувати переддефектний стан, є багатопараметричними і складними в реалізації.

Проведений аналіз показав, що задача удосконалення опосередкованих методів та створення системи контролю процесу зародження мікротріщин та прогнозування їх розвитку у металоконструкціях під час експлуатації, які дозволяють при мінімальній кількості інформативних параметрів забезпечувати необхідну імовірність контролю, є актуальною.

У другому розділі описано метали та конструкції з них, як відкриті системи, в процесі перебудови яких під дією зовнішніх сил, відбувається обмін енергією з оточуючим середовищем. Ефекти самоорганізації в них розглянуто з точки зору дисипативних структур та зміни їх фрактальної розмірності.

Показано, що традиційні методи геометрії, які широко використовуються в природничих науках, в тому числі в матеріалознавстві і механіці деформованих тіл, базуються на наблизеній апроксимації структури досліджуваного об'єкта геометричним фігурам, наприклад лініям, відрізкам, площинам, багатокутникам, багатогранниками, метрична і топологічна розмірність яких рівні між собою. При цьому внутрішня структура досліджуваного об'єкта, як правило, ігнорується, а це в свою чергу, призводить до втрати значної кількості інформації про властивості систем, що досліджуються. Для опису внутрішніх структурних процесів досліджуваних систем, як

самоподібних об'єктів, слід застосовувати фрактальні підходи, які дозволяють компактно описувати об'єкти і процеси у визначених кількісних термінах.

Встановлено, що деформоване тверде тіло доцільно розглядати з позиції синергетики як дисипативну систему, яка характеризується спонтанною перебудовою дислокаційних структур в процесі пластичної деформації. Під час розгляду процесу руйнування, як нерівноважного фазового переходу, визначено зміну фрактальної розмірності дисипативної структури, яка є однією з характеристик руйнування. Поблизу точок біфуркації дисипативні структури володіють властивостями універсальності, масштабної інваріантності та властивістю до самоподібного поширення, тобто, їх можна описувати як фрактальні, що мають дробову розмірність.

Утворення мікротріщини, в даному випадку, можна вважати процесом виникнення двох нових двовірних поверхонь на місці тривимірного об'єму: мікротріщини, як двох поверхонь з розмірністю 2 і перехідного шару з просторовою розмірністю, що змінюється від 3 до 2. Енергія перехідного шару має максимальне значення із всіх значень енергії граничних зон структурних елементів металу.

Комплексний аналіз поведінки металів і сплавів під час перебудови дисипативних структур показав, що ознакою дисипативних властивостей матеріалу при самоподібному руйнуванні є фрактальна розмірність, яка враховує внесок в дисипацію енергій двох основних механізмів: пластичної деформації і утворення мікротріщини, що супроводжується стрибкоподібною зміною температури на поверхні металічної напружено-деформованої конструкції.

З термодинамічної точки зору, процеси пластичної деформації, пошкодженості і руйнування твердого тіла є взаємопов'язаними процесами, під час яких робота зовнішніх сил викликає зміну та перетворення внутрішньої енергії.

Для визначення критичного значення густини внутрішньої енергії, що накопичується у деформованому тілі до моменту його руйнування (втрати стійкості кристалічної ґратки), застосовано теорію енергетичної аналогії процесів плавлення і механічного руйнування, як таку, що більш повно описує ці процеси.

Розроблена термодинамічна модель, що дозволяє оцінювати зміну температури на поверхні металічної конструкції в момент зародження мікротріщини, описується за допомогою наступних рівнянь:

диференціальним рівнянням теплопровідності з джерелом теплоти всередині тіла

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (1)$$

де c – питома теплоємність середовища; ρ – густина середовища; $\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ – оператор

Лапласа, який позначають скорочено ∇^2 ; $a = \frac{\chi}{c \cdot \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, що

характеризує швидкість зміни температури; $T \equiv T(\bar{r}, t)$ – об'ємно-часова функція розподілу температури; $q_v \equiv q_v(\bar{r}, t)$;

рівнянням калориметричного ефекту

$$Q(\bar{r}) = \sum c_i \cdot \delta(\bar{r} - \bar{r}_i), \quad (2)$$

де $\delta(\vec{r} - \vec{r}_i)$ - функція Дірака; c_i - тепловий ефект утворення мікротріщини; \vec{r}_i - розташування мікротріщини;

рівнянням поширення тепла від джерела енергії

$$Q(\vec{r}) = \left(\frac{2}{\pi\sigma}\right)^3 \cdot A \cdot \exp\left(-2\frac{|\vec{r} - \vec{r}_0|^2}{\sigma}\right), \quad (3)$$

де A - потужність джерела тепла; σ - середнє квадратичне відхилення; \vec{r}_0 - розташування джерела теплової енергії.

Вирази 1-3 є основними рівняннями математичної моделі, яка описує розподіл температури на верхній грані зразка в залежності від глибини залягання мікротріщини. З використанням розробленої моделі проведено числове моделювання для визначення температурних розподілів на поверхні об'єкта контролю.

Розрахунок проводився за допомогою розробленої програми в середовищі Flex PDE версії 5 компанії PDE Solution Inc (рис.1 та рис.2). Дослідження температурного розподілу на поверхні зразка передбачає розв'язання рівняння теплопровідності з відповідними початковими та краєвими умовами. Зразок обрано у формі паралелепіпеда з розмірами $40 \times 20 \times 8$ мм, матеріали зразка - конструкційна сталь Ст3, Ст20, та сталь Ст45, температура зовнішнього середовища 15°C .

На рис.1 показано залежність температури на поверхні зразка від глибини залягання мікротріщини по центральній осі (матеріал сталь Ст3).

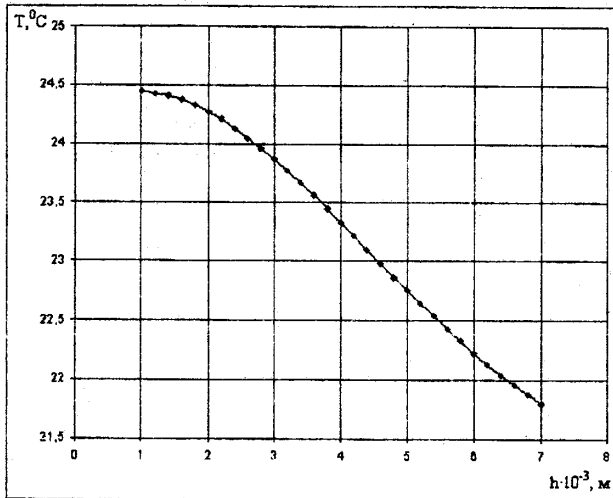


Рис. 1. Залежність температури на поверхні зразка від глибини залягання мікротріщини по центральній осі (матеріал сталь Ст3)

Аналогічні залежності отримано для матеріалу сталь Ст20, Ст45.

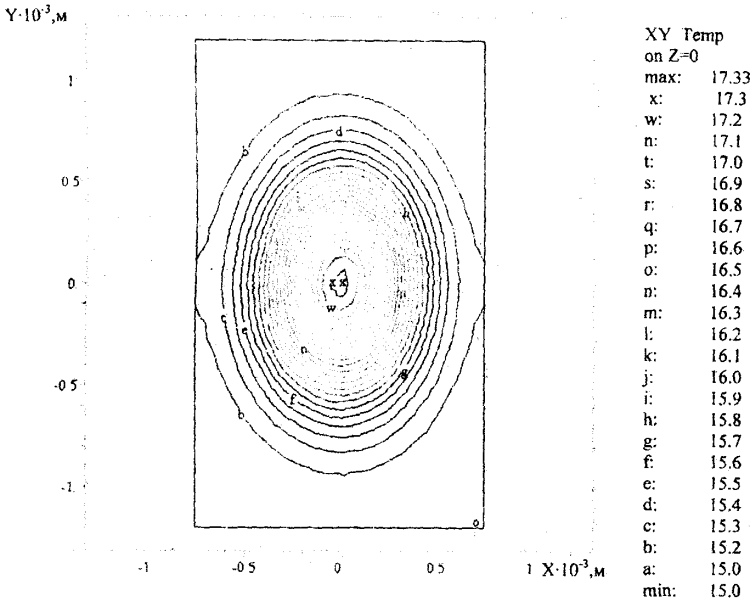


Рис.2. Ізолнії температурного розподілу на поверхні зразка при глибині залягання мікротріщини $4 \cdot 10^{-3}$ м

Опис металічної конструкції, що перебуває у напружено-деформованому стані, як дисипативної системи, дав можливість дослідити її термомеханічні властивості, а проведений аналіз одержаних температурних розподілів на верхній грані зразка в залежності від глибини залягання мікрodefекту остаточно довів можливість контролю моменту зародження мікротріщини, застосовуючи як інформативний параметр зміну температури на поверхні металу.

У третьому розділі розроблено систему контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях та проаналізовано її динамічні характеристики.

В результаті проведеного аналізу існуючих мікроелектронних сенсорів для вимірювання температури запропоновано як чутливий елемент засобу контролю використати проградуїований напівпровідниковий давач типу DS, що характеризується високою точністю і швидкодією та малою інерційністю.

На базі обраного давача температури розроблено схему перетворювача, за допомогою якого можна отримати напругу, що пропорційна температурі.

Структурну схему розробленого перетворювача з використанням джерела струму і диференційного підсилювача наведено на рис. 3.

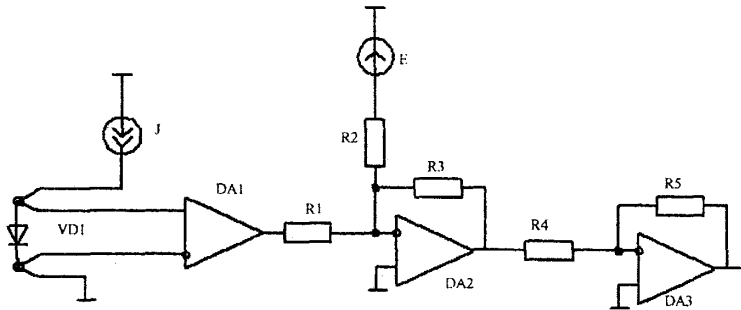


Рис.3. Структурна схема вимірювача температури

Для усунення напруги потенційного бар'єру $p-n$ переходу напівпровідникового давача застосовано різницевий підсилювач. При цьому вихідна напруга із попереднього каскаду за допомогою резистора, включеного до входу операційного підсилювача, перетворюється в струм 100 мкА. Для передачі результатів вимірювання на відстань вихідний сигнал повинен бути порядку 4-20мА. Для цього використовується перетворювач напруги в вихідний струм.

Для збільшення динамічного діапазону вимірювального сигналу передбачено компенсування спаду напруги на перетворювачі при температурі 0°C .

Коефіцієнт підсилення диференційного підсилювача вибрано 10. Для компенсування напруги використовується різницевий підсилювач. З метою збільшення вихідної напруги і приведення її до стандартної величини після різницевого підсилювача встановлено інвертуючий підсилювач з коефіцієнтом підсилення 10. Стабільність коефіцієнту підсилення забезпечується використанням прецизійних резисторів у колі зворотнього зв'язку. Вихідна напруга буде пропорційною температурі.

Вимірювач температури змонтовано в корпус з габаритними розмірами $300 \times 200 \times 165$ мм.

В розробленій системі контролю на основі створеного вимірювача температури дискретизація аналогового сигналу здійснюється за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Застосування буферів та шинних формувачів обумовлено необхідністю захисту від комутаційних струмів та запобігання надлишкового вихідного струму.

Вхідна напруга дискретизується в 15-ти розрядний код АЦП ($2^{15} = 32768$). Дискретність представлених значень становить:

$$\frac{(50-0)}{0-2,3725} \cdot \frac{2,5}{32768} \approx 0,0016 \quad (4)$$

Обмін між вузлом обробки вихідного сигналу і ЕОМ здійснюється через паралельний порт. АЦП калібрується за допомогою сервісної програми при нульовій та максимальній вхідній напругах. Для усунення впливу завад на частоті мережі живлення 50 Гц частоту дискретизації вибрано рівною 50 Гц.

Для визначення співвідношення між кодом АЦП і вимірюваною температурою проаналізовано залежність цифрового коду K та напруги від виміряної температури.

Для забезпечення захисту від сторонніх завад всі сигнальні вузли перетворювача змонтовано в металевому екрані. Для налагодження та регулювання перетворювача передбачено резистори змінного опору, що розташовані біля отворів в екрані.

Для підтвердження можливості вимірювання "стрімкої" зміни температури досліджено динамічні характеристики розробленої системи.

Передавальна функція системи складається з передавальних функцій елементів, що входять до складу даної системи, і описується як добуток передавальних функцій всіх складових елементів системи:

$$G(p) = G_e(p) \cdot G_d(p) \cdot G_n(p) \cdot G_{цип}(p), \quad (5)$$

де $G_e(p)$ - передавальна функція епоксидного шару, яким залитий чутливий елемент; $G_d(p)$ - передавальна функція напівпровідникового давача; $G_n(p)$ - передавальна функція підсилювача; $G_{цип}(p)$ - передавальна функція аналого-цифрового перетворювача.

Загальний вигляд передавальної функції системи має вигляд:

$$Y(p) = X(p) \cdot G(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{1 + \tau_e p} \cdot \frac{1}{1 + \tau_d p} \cdot \left(\frac{k \cdot \frac{1}{1 + \tau_n p}}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot k \cdot \frac{1}{1 + \tau_n p}} \right)^2 \cdot e^{-\tau_r p}. \quad (6)$$

де k - передавальний коефіцієнт підсилювача без зворотного зв'язку; $p = d/dt$ - оператор диференціювання; $\tau_e, \tau_d, \tau_n, \tau_r$ - постійні часу елементів системи.

Здійснивши зворотнє перетворення Лапласа, одержано залежність вихідної величини від часу при стрибкоподібному збуренні на вході розробленої системи.

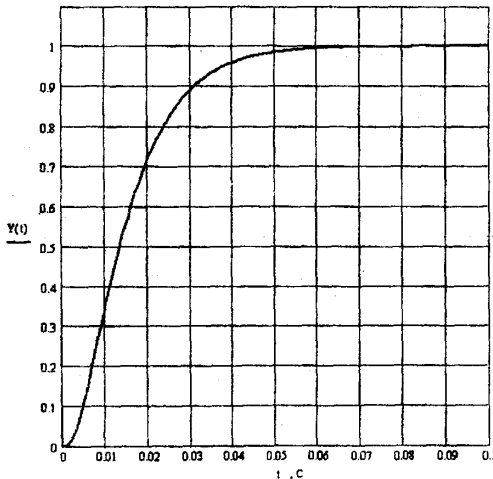


Рис.4. Залежність вихідної величини від часу при стрибкоподібному збуренні

За результатами аналізу передавальної функції системи встановлено, що її динамічні характеристики дозволяють контролювати швидкозмінні значення температури: при стрибкоподібній зміні вхідного параметра зміна вихідного носить аперіодичний характер, а час, протягом якого вихідна величина відтворює вхідну величину з похибкою, яка не перевищує 1%, рівний $t=0,058c$.

У **четвертому розділі** проаналізовано метрологічні характеристики системи контролю розвитку мікротріщин у напружено – деформованих конструкціях.

Метрологічний аналіз системи полягав не тільки у визначенні похибки розробленого засобу вимірювання температури на поверхні об'єкта контролю, а й в аналізі ймовірності результатів проведення контролю зародження та розвитку мікротріщин за зміною величини інформативного параметра.

Процедура контролю спрямована на розподіл об'єктів на справні і несправні, тобто, на такі, в яких відсутні мікротріщини і на такі, що їх мають. Контрольований параметр, тобто температура на поверхні твердого тіла, порівнюється з певним значенням, що може бути задане у вигляді допуску, і виходячи з цього формується рішення про результати контролю.

З метою оцінки складових похибки розробленої системи контролю проаналізовано структуру системи, кожен елемент якої має відповідні складові похибки, що впливають на результат вимірювання температури, як інформативного параметра.

Аналітичне вираження загальної похибки унеможливило врахувати всі особливості застосування конструктивних рішень, які базуються на чисельних послідовних та паралельних з'єднаннях окремих елементів та блоків, а також, є занадто громіздким. Для дослідження загальної похибки застосовано експериментальний метод визначення метрологічних характеристик розробленої системи контролю.

При визначенні загальної похибки враховано точність перетворення інформативного параметра у вимірювальний сигнал та оцінено зміну похибки вимірювання інформативного параметра від його величини.

В основу експериментальних досліджень був покладений імітаційний метод, який полягає у заміні чутливого елемента зразковим джерелом напруги. Заданий діапазон напруги відповідає значенням, поданим у градувальній характеристиці чутливого елемента при зміні температури від 0 до 60°C. Багаторазові вимірювання проводилися у точках діапазону з кроком у 5°C. При цьому було одержано 13 вибірок.

Кожен елемент у вибірці прийнято за випадкову величину. Найбільш повною характеристикою величини, а отже, і похибки є її закон розподілу, за яким визначається характер появи різних результатів окремих вимірювань.

Для подальшої обробки одержаних результатів вимірювань перевірено кожен вибірку на нормальність розподілу випадкових величин. Перевірку на нормальність розподілу проведено за двома методами: критерієм Пірсона (χ^2) та критерієм згоди Колмогорова – Смірнова. Дані перевірок за цими критеріями оцінювання закону розподілу результатів вимірювання у всіх вибірках свідчать про нормальність закону розподілу випадкових величин. Також визначено числові характеристики випадкових величин у кожній вибірці, а саме математичне очікування та дисперсія.

Наступним етапом дослідження метрологічних характеристик системи контролю є оцінка зміни похибки вимірювання в залежності від зміни величини інформативного параметра. Для цього було проаналізовано форми зв'язку між одержаною похибкою та величиною інформативного параметра. Дана форма зв'язку характеризується функцією регресії, що виражає математичне очікування змінної похибки, коли інформативний параметр приймає певне значення. Одержані значення коефіцієнта кореляції вказують на нелінійний функціональний зв'язок між змінними, а похибка вимірювання інформативного параметра в залежності від його величини не перевищує 0,7%.

Проаналізувавши результати одержаних експериментальних досліджень на натурних зразках, проведено оцінку достовірності контролю утворення мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях за допомогою розробленої системи.

Визначено ймовірність виявлення мікротріщин у напружено – деформованих конструкціях, яка становить $P=0,95$.

У **п'ятому розділі** викладено методику та результати експериментальних досліджень, які проводились з метою перевірки теоретичних положень та висновків, одержаних у попередніх розділах.

У процесі проведення лабораторних досліджень динамічних характеристик розробленої системи контролю було змодельовано періодичну зміну температури поверхні з певною частотою шляхом торкання давача до поверхні нагрітого металу на короткий проміжок часу. В результаті доведено можливість застосування системи контролю для оцінки швидкоплинних температурних змін на поверхні металічних конструкцій, які виникають при зародженні і розвитку мікротріщин в тілі таких конструкцій.

Експериментальні дослідження процесу зародження та розвитку мікротріщин проводились з використанням реальних зразків виготовлених з найпоширеніших конструкційних сталей (Ст3, Ст 20, Ст 45), які попередньо не знаходились під дією навантажень.

Робоча частина зразка вибиралась такою, щоб його центральна частина перебувала в умовах одновісного розтягу, а повздовжні розтягувальні напруження були рівномірно розподілені по площі поперечного перерізу. Таким чином, у центральній частині зразка будуть діяти лише нормальні напруження, а на його поверхнях – дотичні.

Середня частина кожного із зразків проходила механічну обробку шляхом її фрезерування із наступним шліфуванням. Зменшення поперечного перерізу середньої частини експериментального зразка дозволило послабити опір руйнуванню і збільшити концентрацію напружень у цій зоні по відношенню до цілого зразка. Це дало можливість ініціювати зону ймовірного утворення дефекту.

Під час створення зони ймовірного утворення дефекту метал зразка може набути певних напружень через температурні та механічні деформації. Тому після виготовлення зразків їх піддавали відпуску.

Для визначення зміни температури на поверхні об'єкта контролю використано метод випробування на статичний розтяг зразків при температурі оточуючого середовища 15°C , та відносній вологості 80%. Перед проведенням експериментальних досліджень зразки знаходились при даних умовах протягом 8 годин. Навантаження на статичний розтяг зразків створювалось розтягуючою машинною типу УММ–50.

Експериментальні зразки встановлювалися у тримачі розтягуючої машини, а чутливий елемент засобу контролю закріплювався у зоні ймовірного утворення дефекту. Перед подачею навантаження засіб контролю було витримано протягом 5 хв. у ввімкненому стані з метою встановлення початкового значення температури, яке фіксувалося у протоколі проведення експериментальних досліджень. З подачею навантаження і поступовим його збільшенням фіксувалась зміна температури на поверхні зразка.

Одержані експериментальні залежності температури на поверхні зразків з сталі Ст20 і сталі Ст45 від прикладеного навантаження зображено на рис. 5 та рис.6 відповідно.

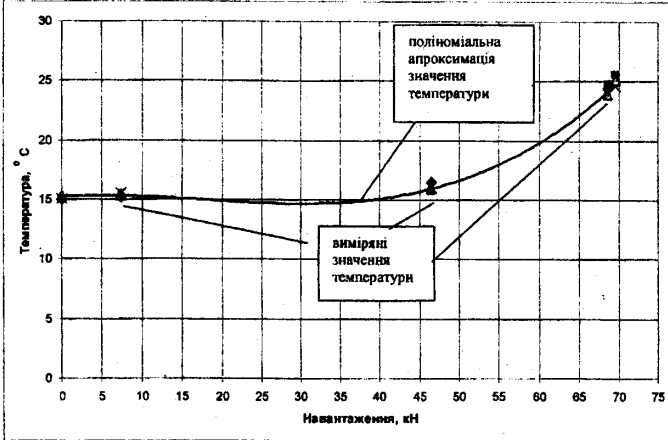


Рис. 5. Залежність температури на поверхні зразків виготовлених з сталі Ст20 від прикладеного навантаження зразки з сталі Ст45

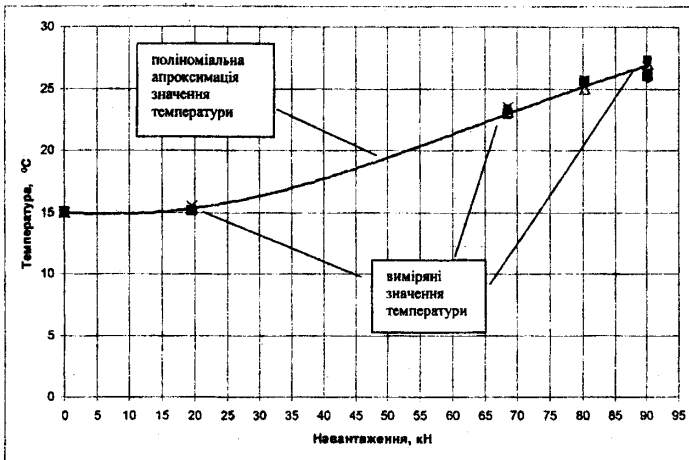


Рис. 6. Залежність температури на поверхні зразків виготовлених з сталі Ст45 від прикладеного навантаження

Зростання навантаження призводить до зростання температури, яке носить нелінійний характер. Отримана висока повторюваність результатів при дослідженні багатьох зразків підтверджує достатню стабільність статичних характеристик розробленої системи контролю.

Після виявлення стрімкої зміни температури (рис.7) подача навантаження припинялась, а дослідні зразки перевірялись на наявність несущільностей рентгівським та акустичним методами контролю. У зоні ймовірного утворення дефекту зразки розпилювались, а отримані розпили досліджувались за допомогою мікроскопа Carl Zeiss NU 2e.

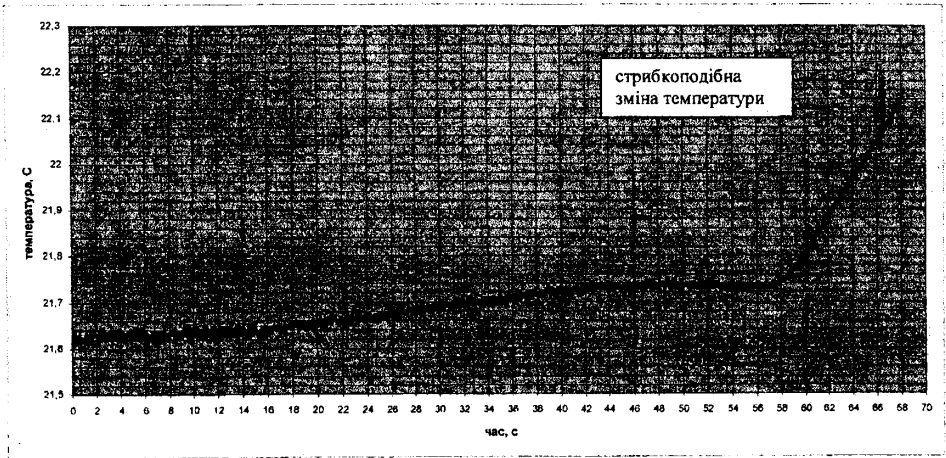


Рис.7. Залежність температури на поверхні зразка зі сталі Ст3 від часу, протягом якого навантаження збільшується рівномірно

Дослідивши відрізок часу від 50 до 70 с визначено, що тривалість стрибокподібної зміни температури становить $t=0,98\text{с}$, а амплітудне значення стрибка температури $T_a=0,12^{\circ}\text{C}$.

У зоні ймовірного утворення дефекту зразки розпилювались, а отримані розпили досліджувались за допомогою мікроскопа Carl Zeiss NU 2e в інституті фізики напівпровідників ім.В.Є.Лошкарьова Національної академії наук України.

На рис. 8 подано збільшене зображення одного з отриманих мікро шліфів, яке підтверджує наявність мікротріщини, зародження і розвиток якої досліджено за допомогою розробленої системи.



Рис.8. Мікрошліф зразка, виготовленого з сталі Ст3

Розроблена система дозволяє оцінити розвиток мікротріщини в макротріщину аж до її виходу на поверхню зразка, але здійснити безпосередній контроль такого процесу є складною задачею, тому в роботі використано опосередкований підхід. Розроблена математична модель процесу та програмна реалізація дозволяє візуалізувати процес розвитку мікротріщини. В основу моделі покладено відомий підхід, за яким розвиток мікротріщин має фрактальний характер.

За допомогою фрактальної механіки руйнувань визначено наступні параметри, що у повній мірі описують процес руйнування металу, а саме: критичний розмір мікротріщини, здатної до самоподібного поширення; максимальний розмір автотривалості зони передруйнування; коефіцієнт масштабу, що визначає тривалість поширення мікротріщини; кількість енергії, що необхідна для самоподібного поширення мікротріщини; фрактальну розмірність дисипативної структури.

Критичний розмір мікротріщини, що має властивість до самоподібного поширення є фрактальним кластером, який буде під дією навантаження копіювати множини на себе. Максимальний розмір автотривалості зони передруйнування показує на яку відстань буде наступний стрибок мікротріщини. Коефіцієнт масштабу визначає тривалість росту мікротріщини і є параметром, що дозволяє перейти від руйнування на мікрорівні до руйнування на макрорівні. Фрактальна розмірність дисипативної структури застосовується для опису характеру мікротріщини. Вказані параметри та залежності, що враховують їх взаємозв'язок, покладені в основу синергетичної моделі руйнувань твердого тіла.

Визначити параметри, що описують процес руйнування, та одержати вид мікротріщини, яка самоподібно поширюється, дозволяє розроблене програмне забезпечення, виконане у середовищі Borland Delphi.

На рис. 9 зображено фрагмент моделювання процесу розвитку мікротріщини у матеріалі сталь Ст3.

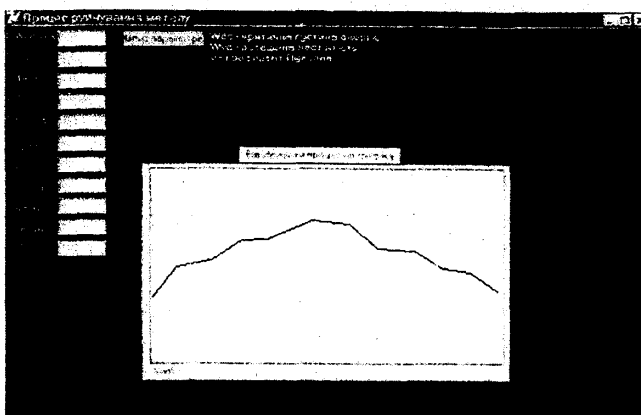


Рис. 9. Фрагмент моделювання процесу розвитку мікротріщини у матеріалі сталь Ст3

Результати експериментальних досліджень розробленої системи контролю розвитку мікротріщини у напружено-деформованих конструкціях доводять правильність запропонованих схемотехнічних рішень для реалізації засобів опосередкованого контролю складних процесів, викликаних структурними перетвореннями в матеріалах конструкцій в залежності від навантажень та терміну експлуатації.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі, що полягає в розробці системи контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях. Проведені дослідження дозволили зробити такі висновки:

1. На основі аналізу відомих методів контролю процесу зародження та розвитку тріщин обґрунтовано доцільність контролю процесу зародження мікротріщини та прогнозування їх розвитку у металоконструкціях під час експлуатації (перебування у напружено-деформованому стані), використовуючи опосередкований підхід.

2. Проаналізовано структурні перетворення та дисипативні процеси у металах конструкції під дією навантажень з позиції синергетики. Доведено, що структурні перетворення за рахунок переміщення та об'єднання лінійних дефектів супроводжуються виділенням енергії з подальшою її трансформацією в теплову, яку можливо оцінити за зміною температури на поверхні напружено-деформованої металічної конструкції.

3. Доведено, що існує структурно-енергетична аналогія між процесами руйнування та плавлення металів, що покладено в основу розробленої термодинамічної математичної моделі, яка дозволяє оцінювати зміну температури на поверхні металічної конструкції в момент зародження мікротріщини. Отримано температурні розподіли по площі верхньої грані зразка в залежності від глибини залегання мікротріщини.

4. Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що інформативним параметром, який характеризує момент зародження мікротріщини, є стрибкоподібна зміна температури. Отримано залежності зміни температури на поверхні об'єкта контролю від прикладеного навантаження. Експериментально підтверджено, що процеси зародження та поширення мікротріщин мають фрактальну структуру, яка володіє спектром дробових розмірностей.

5. Розроблено систему контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях. Визначено її основні метрологічні характеристики і встановлено, що похибка вимірювання температури не перевищує 0,7%, динамічні властивості близькі до аперіодичних, а час, протягом якого вихідна величина відтворює вхідну величину з похибкою, яка не перевищує 1%, рівний 0,058с.

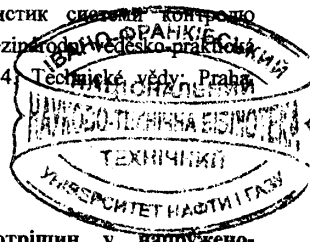
6. На основі синергетичної моделі руйнувань, проведено оцінювання універсальних залежностей між параметрами, які описують структурні перетворення під час зародження, накопичення та розвитку мікроефектів з застосуванням теорії фракталів, що дозволило розробити програмне забезпечення для оцінки розвитку мікротріщин розробленою системою контролю.

7. Розроблена у дисертаційній роботі система контролю пройшла промислові випробування в лабораторії механічних вимірювань ВАТ «Івано-Франківський арматурний завод» і рекомендована до впровадження. Матеріали дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес ІФНТУНГ на кафедрі інформаційно-вимірювальної техніки у курсі «Технологічні вимірювання та прилади» і на кафедрі електротехніки у курсі «Електротехнічні і конструкційні матеріали» для підготовки спеціалістів за спеціальністю «Метрологія та вимірювальна техніка»

СПИСОК ОПУБЛКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Чеховський С.А., Кононенко М.А., Габльовська Н.Я. Системи контролю внутрішньої структури об'єктів з використанням фрактального підходу // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Міжнародний науково-технічний журнал. – Хмельницький: ТУП, 2002. - №1. – С.188-189.
2. Габльовська Н.Я. Дослідження термодинамічних ефектів при утворенні мікротріщин в сталевих конструкціях // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Державний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Івано-Франківськ: "Факел", 2005. - №1(14). -С.103-107.
3. Габльовська Н.Я. Моделювання деформаційних процесів з метою встановлення універсальних зв'язків між параметрами, що характеризують мікро- та макроструктуру металу // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2005. - №1(10). С.156-160.
4. Габльовська Н.Я. Термодинамічні ефекти як інформативні параметри для контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях // Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" серія Приладобудування. - 2005. – Випуск 30. - С.85-94.
5. Луцишин Т.І., Габльовська Н.Я., Кононенко М.А. Дослідження термомеханічних властивостей металу в момент зародження мікроефекту // Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ". – Івано-Франківськ, 2006. - №4(21). с.86-89.

6. Чеховський С.А., Кононенко М.А., Габльовська Н.Я. Система контролю напружено-деформованого стану твердого тіла за зміною температури // Приладобудування 2003: підсумки і перспективи: Збірник тез наук.-техн. конф. - Київ: МПП "Темп", 2003. – С. 156-157.
7. Габльовська Н.Я. Експериментальні дослідження зміни температури як інформативного параметра для контролю процесу розвитку мікротріщин // Приладобудування 2004: підсумки і перспективи: Збірник тез наук.-техн. конф. - Київ: ПП "ППНВ", 2004. - С. 202-203.
8. Габльовська Н.Я., Кононенко М.А. Контроль зародження тріщин в металах за оцінкою енергетичних процесів в перехідному підповерхневому шарі // Приладобудування 2004: підсумки і перспективи: Збірник тез наук.-техн. конф. - Київ: ПП "ППНВ", 2004. - С. 201-202.
9. Габльовська Н.Я. Використання термодинамічних ефектів як інформативних параметрів для контролю розвитку мікротріщин у напружено - деформованих конструкціях // Приладобудування 2005: підсумки і перспективи: Збірник тез наук.-техн. конф. - Київ: ПП "ППНВ", 2005. - С. 236-237.
10. Чеховський С.А., Габльовська Н.Я. Дослідження метрологічних характеристик системи контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях. // Приладобудування 2006: підсумки і перспективи: Збірник тез наук.-техн. конф. - Київ: ПП "ППНВ", 2006. - С. 240.
11. Габльовська Н.Я. Оцінка точності опосередкованого контролю напружено-деформованого стану металічних конструкцій // V Міжнародна науково-технічна конференція "Метрологія та вимірвальна техніка": Наукові праці конференції у 2-х томах. – Харків, 2006. – С.97-100.
12. Габльовська Н.Я. Дослідження динамічних характеристик процесу утворення тріщин в металевих конструкціях // Materiály IV mezinárodní vědecko-praktické conference "Vědecký průmysl evropského kontinentu - 2007". – Díl 14. Publishing House "Education and Science" s.r.o – S.45-49.



АНОТАЦІЯ

Габльовська Н.Я. Система контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2008.

Дисертація присвячена питанню контролю зародження та розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях. Запропоновано метод контролю розвитку мікротріщин за зміною температури на поверхні об'єкта контролю як інформативного параметра.

Досліджено процес зародження мікротріщини з позиції синергетики з застосуванням теорії фракталів та фрактальної геометрії. Проаналізовано енергетичні зміни, що виникають під час структурних перетворень у металах напружено-деформованої конструкції. Встановлено інформативний параметр, що характеризує процес зародження мікротріщини. Розроблено і програмно реалізовано математичну термодинамічну модель, що дозволяє оцінити за зміною

температури на поверхні конструкції момент зародження мікротріщини. Проведено експериментальні дослідження, з встановлення залежності зміни температури на поверхні об'єкта контролю від прикладеного навантаження в момент зародження мікротріщин, які мають фрактальну природу та здатність самоподібно поширюватись.

Розроблено систему контролю розвитку мікротріщин у напружено - деформованих металічних конструкціях, що має наступні характеристики: високу чутливість та швидкодію; малі габаритні розміри і вагу; похибку вимірювання температури, яка не перевищує 0,7%.

Основні результати роботи знайшли технічне впровадження в ВАТ "ІФАЗ", ВКФ "Інтеп", Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу. Крім цього, результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджено в навчальний процес.

Ключові слова: напружено-деформований стан, інформативний параметр, зміна температури, мікротріщина, фрактальна геометрія, самоподібне поширення.

АННОТАЦИЯ

Габлѣвская Н.Я. Система контроля развития микротрещин в напряженно деформированных металлических конструкциях – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. - Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2008.

Диссертация посвящена вопросу контроля зарождения и развития микротрещин в напряженно - деформированных металлических конструкциях. Предложен метод контроля развития микротрещин по изменению температуры на поверхности объекта контроля как информативного параметра.

Исследовано процесс зарождения микротрещины, исходя из позиции синергетики, с применением теории фракталов и фрактальной геометрии. Проанализированы энергетические изменения, которые возникают во время структурных превращений в металлах напряженно - деформированной конструкции. Разработана и программно реализована математическая термодинамическая модель, которая позволяет по изменению температуры на поверхности металлической напряженно - деформированной конструкции оценить момент зарождения микротрещины. Проведены экспериментальные исследования по установлению зависимости изменения температуры на поверхности объекта контроля от приложенной нагрузки в момент зарождения микротрещин, которые имеют фрактальную природу и способность самоподобно развиваться. Определены критические параметры, которые в полной мере описывают процесс разрушения металла, а именно: критический размер микротрещины, способной самоподобно развиваться; максимальный размер автотемперирующей зоны предразрушения; коэффициент масштаба, определяющий продолжительность развития микротрещины; количество энергии, необходимой для самоподобного развития микротрещины. Результаты экспериментальных исследований были положены в основу системы контроля развития микротрещин в напряженно - деформированных металлических конструкциях, для которой разработано средство измерения изменения температуры на поверхности металлоконструкции в зоне вероятного разрушения. Проведенный анализ основных характеристик системы контроля показал, что контроль зарождения микротрещин осуществляется с высокой чувствительностью к изменению информативного

параметра, большой скоростью регистрации изменения температуры и погрешностью измерения температуры не более 0,7%. Средство измерения изменения температуры имеет малые габаритные размеры и вес, возможность обработки результатов измерений с помощью ЭВМ.

Основные результаты работы внедрены в ОАО "ИФАЗ", ПКФ "Интер", Ивано-Франковском национальном техническом университете нефти и газа. Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс при преподавании дисциплин для специальности "Метрология и измерительная техника".

Ключевые слова: напряженно - деформированное состояние, информативный параметр, изменение температуры, микротрещина, фрактальная геометрия, самоподобное распространение.

THE SUMMARY

Gablyovska N.J. System of control of development of microcrackes in the tensely deformed metallic constructions. - Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by speciality 05.11.13 - instruments and methods of the checking and determinations of compositions material. – The Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2008.

Work is devoted the question of microcracke origin and development control in the tensely deformed metallic constructions. The method of control microcracke development is offered after the change of temperature on the surface of control object as informing a parameter. Probed a process of origin of microcracke is from position of fractals theory and fractal geometry. The temperature change on the surfaces of the metallic tensely deformed construction is set as informing parameter. It is developed and a mathematical thermodynamics model is programmatic realized. Experimental researches are allowed to establish temperature dependence on the surface of control object from the enclosed loading in the moment of origin of microcracke. The checking of microcracke development system in tensely deformed metallic constructions is developed, which has the followings descriptions: high sensitiveness to the change informing a parameter, high speed of temperature change registration, small overall sizes and weight, possibility of measurings results treatment by computer, the error of measuring of temperature does not exceed 0,7%. The basic results of work found technical introduction in VAT of "ИФАЗ", VKF "Интер", Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. The results of theoretical and experimental researches are inculcated in an educational process at teaching of disciplines for speciality "Metrology and measuring technique".

Keywords: tensely deformed state, informing parameter, change of temperature, microcracke, fractal geometry, selfsimilar distribution.