

681.518

П 12

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

Габльовська Надія Ярославівна

УДК 681.325

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ 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 - 2007

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-вимірювальної 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
Сопронюк Федір Олексійович,
Чернівецький національний університет
ім. Ю.Федьковича, завідувач кафедри
математичних проблем
управління і кібернетики

Провідна установа: Фізико-механічний інститут ім.Г.В. Карпенка
НАН України



Захист від
Д 20.052.03
м.Івано-Фр

З дисертац
університе

Авторефер

ованої вченої ради
афти і газу (76019,

ального технічного

Вчений сек

чук М.М.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан парку металоконструкцій і обладнання, що експлуатується в нафтогазовій промисловості, характеризується значним 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 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу "Метрологія і вимірвальна техніка в нафтогазовій галузі та приладобудуванні" (номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ

№0101U001664), в котрій 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) провести аналіз процесу зародження мікротріщини з позиції синергетики, використовуючи підходи фрактальної теорії;

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 момент зародження мікротріщини. Провести експериментальні дослідження з підтвердження одержаних залежностей інформативного параметру від навантажень;

4) провести модельне оцінювання універсальних залежностей між параметрами, що описують структурні перетворення під час зародження, накопичення та розвитку мікротріщин.

5) розробити систему контролю зародження та розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях;

6) визначити основні метрологічні характеристики розробленої системи контролю зародження та розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях.

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:

- вперше одержано і реалізовано метод контролю моменту зародження мікротріщини в металоконструкції, що перебуває у напружено-деформованому стані, з використанням температурних змін як інформативного параметру;

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

- одержано математичну термодинамічну модель, яка дозволяє оцінювати зміну температури на поверхні металічної напружено-деформованої конструкції в момент зародження мікрodefекту;

- удосконалено метод контролю зародження мікротріщин за зміною температури на поверхні металокопструкції.

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 момент зародження та 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 і полягає у формулюванні задач досліджень, моделюванні процесів, а також в експериментальній перевірці та реалізації результатів досліджень. 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.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 11 робіт (в тому числі 6 одноособових), з них 5 - у фахових виданнях, 6 - 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 125 сторінок, 37 рисунків, 7 таблиць, 9 додатків. Список використаних джерел містить 116 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 об'єктів нафтогазовидобувної промисловості, умов їх експлуатації, методів контролю утворених дефектів (тріщин) 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 грають суттєву роль при визначенні довговічності конструкцій лише на кінцевих стадіях експлуатації металу, коли мікрodefекти структури вже сформувалися, починають зливатись і утворювати макроdefекти, доступні для виявлення defектоскопами.

Утворення defектів з найбільшою імовірністю виникають у заздалегідь 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 мікрodefektів. 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 створення опосередкованих методів та засобів 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 перебування 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 наближеній апроксимації структури досліджуваного об'єкта геометричним фігурам, наприклад лініям, відріzkам, 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 бифуркації дисипативні структури володіють властивостями універсальності, масштабної інваріантності та властивістю до самоподібного поширення.

Характер порушення суцільності кристалічної будови металів та утворення в них мікротріщин при пластичній деформації визначаються властивостями самих металів та наявністю в них точкових та лінійних дефектів. Дія навантаження на метал призводить до безперервного збільшення в ньому густини лінійних дефектів - дислокацій, а метал при цьому, переходить з

пружного стану в пластичний. При досягненні критичного значення густини дислокацій утворюється рихла аморфна структура, яку можна описувати як фрактальну, що має 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. Саме в цьому шарі активізується процес дифузії дислокацій і за рахунок їх переміщення та об'єднання відбувається трансформація їх енергії в поверхневу енергію мікротріщини, що супроводжується локальним підвищенням температури на поверхні металу, яке піддається рєсструванню.

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

У третьому розділі проаналізовано енергетичні зміни, що проходять у структурі металу під час зародження мікродефектів.

З термодинамічної точки зору, процеси пластичної деформації, пошкодженості і руйнування твердого тіла є взаємопов'язаними процесами, під час яких робота зовнішніх сил перетворюється на дві складові внутрішньої енергії.

Частина енергії, що пов'язана з тепловим ефектом пластичної деформації, не затримується в деформованому металі, а розсіюється у зовнішньому середовищі за рахунок теплообміну. Інша частина енергії теплового ефекту накопичується в твердому тілі, що зазнає деформації, у вигляді теплової складової внутрішньої енергії, і підвищує його температуру.

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. Прихована теплота плавлення є енергією, необхідною для порушення зв'язків у гранично спотвореній кристалічній ґратці. Під дією механічного навантаження пластична деформація протікає неоднорідно по об'єму металу, а руйнування носить локальний характер. Тобто, це означає, що не всі міжатомні зв'язки порушуються в об'ємі, а тільки ті, які при даних умовах навантаження виявилися найбільш слабкими. Під час плавлення металів процес порушення зв'язків відбувається по об'єму більш однорідно. Тому, енергію, затрачену на руйнування, можна ототожнити з прихованою температурою плавлення тільки у тому випадку,

якщо питома енергія руйнування визначається не по відношенню до всього об'єму металу, а по відношенню до одиниці об'єму металу з порушеними зв'язками дальнього порядку.

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

диференційним 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 ; $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$ – коефіцієнт теплопровідності, що

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

рівнянням теплопровідності

$$\text{div}[a \cdot \text{grad}(T)] + \frac{q_v}{c\rho} = \frac{\partial T}{\partial t}; \quad (2)$$

рівнянням калориметричного ефекту

$$Q(\bar{r}) = \sum c_i \cdot \delta(\bar{r} - \bar{r}_i), \quad (3)$$

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

рівнянням поширення тепла від джерела енергії

$$Q(\bar{r}) = \left(\frac{2}{\pi\sigma} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot A \cdot \exp \left(-2 \frac{|\bar{r} - \bar{r}_0|^2}{\sigma} \right), \quad (4)$$

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

Вирази 1-4 є основними рівняннями математичної моделі, яка описує розподіл температури по площі верхньої 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 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 $20 \times 15 \times 8$ мм, матеріали зразка - конструкційна сталь 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 Ст20).

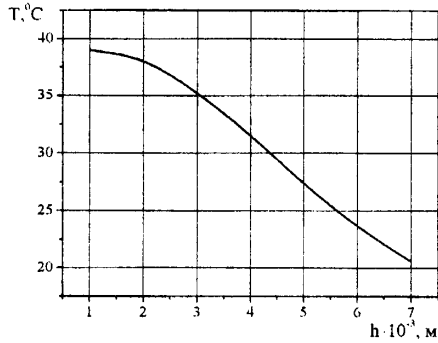
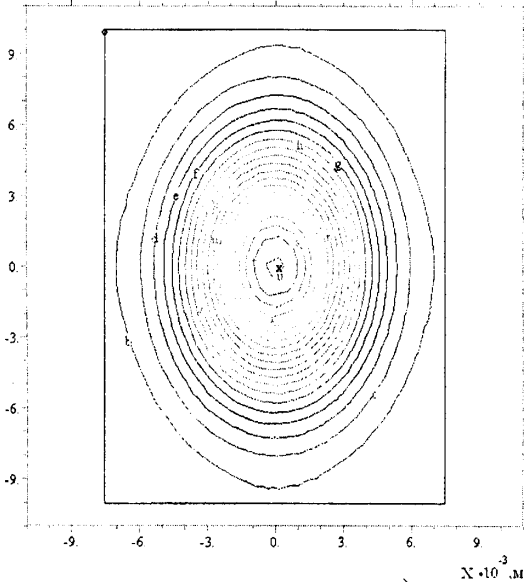


Рис.1. Залежність температури на поверхні зразка від глибини залягання мікротріщини по центральній осі (матеріал сталь Ст20)

Аналогічну залежність отримано для матеріалу сталь Ст45.

На рис.2 наведено ізолінії температурного розподілу на поверхні зразка при різних глибинах залягання мікротріщини.

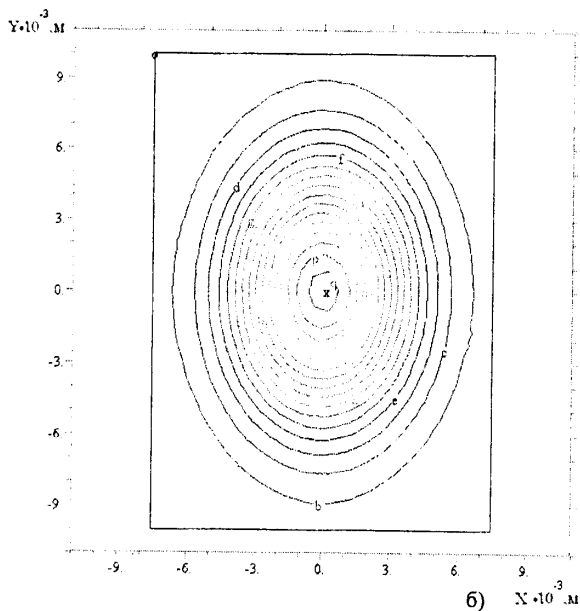
$Y \cdot 10^{-3}$



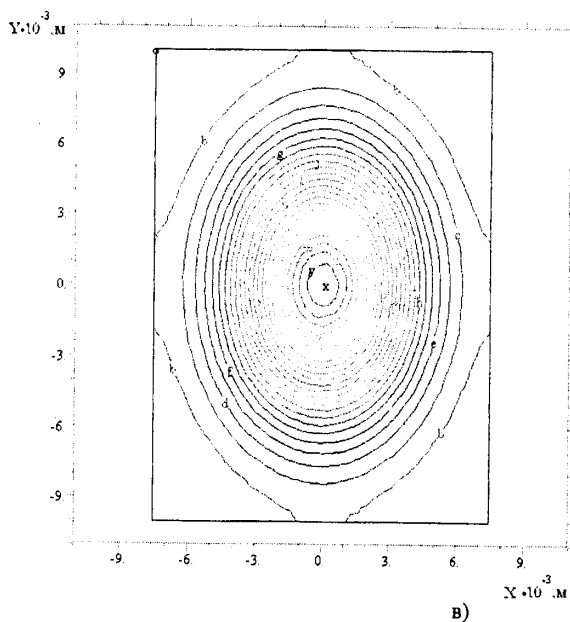
XY Temp
on Z=0
max: 35.2
u: 35.0
t: 34.0
s: 33.0
r: 32.0
q: 31.0
p: 30.0
o: 29.0
n: 28.0
m: 27.0
l: 26.0
k: 25.0
j: 24.0
i: 23.0
h: 22.0
g: 21.0
f: 20.0
e: 19.0
d: 18.0
c: 17.0
b: 16.0
a: 15.0
min: 15.0

a)

$X \cdot 10^{-3}$ м



XY Temp on Z=0	
max:	31.5
q:	31.0
p:	30.0
o:	29.0
n:	28.0
m:	27.0
l:	26.0
k:	25.0
j:	24.0
i:	23.0
h:	22.0
g:	21.0
f:	20.0
e:	19.0
d:	18.0
c:	17.0
b:	16.0
a:	15.0
min:	15.0



XY Temp on Z=0	
max:	27.4
y:	27.0
x:	26.5
w:	26.0
v:	25.5
u:	25.0
t:	24.5
s:	24.0
r:	23.5
q:	23.0
p:	22.5
o:	22.0
n:	21.5
m:	21.0
l:	20.5
k:	20.0
j:	19.5
i:	19.0
h:	18.5
g:	18.0
f:	17.5
e:	17.0
d:	16.5
c:	16.0
b:	15.5
a:	15.0
min:	15.0

Рис.2. Ізолінії температурного розподілу на поверхні зразка при різних глибинах залягання мікротріщини від верхньої грані зразка: а) $2,7 \cdot 10^{-3}$ м; б) $4 \cdot 10^{-3}$ м; в) $5,3 \cdot 10^{-3}$ м. Аналогічні температурні розподіли одержано для матеріалу сталь Ст45.

Одержані температурні розподіли по площі верхньої грані зразка в залежності від глибини залягання мікротріщини дозволили зробити висновок, що зміну температури на поверхні зразка можна обрати за інформативний параметр для контролю моменту зародження мікротріщини.

Розглянувши металічну конструкцію, що перебуває у напружено-деформованому стані, як дисипативну систему, та дослідивши її термомеханічні властивості, можна стверджувати про можливість контролю моменту зародження мікротріщини, застосовуючи як інформативний параметр зміну температури на поверхні металу в зоні ймовірного утворення мікротріщини.

У четвертому розділі викладено методику та результати експериментальних досліджень, які проводились з метою перевірки теоретичних положень та висновків, одержаних у попередніх розділах, а також визначено основні характеристики засобу контролю моменту зародження та розвитку мікротріщини у металічних конструкціях, що перебувають у напружено-деформованому стані, за стрибкоподібною зміною температури на їх поверхні.

В якості чутливого елемента засобу контролю використано проградуйований напівпровідниковий давач, що характеризується високою точністю і швидкодією, малою інерційністю. Сигнал від чутливого елемента по багатокаскадній схемі, базованій на двох різних інвертуючих каскадах, з використанням прецизійних підсилювачів, подається на ПЕОМ. Прийняті схемотехнічні рішення дозволили реалізувати засіб, який контролює зміну температури на поверхні тіла.

За допомогою розробленого засобу контролю проведено експериментальні дослідження з метою підтвердження можливості використання зміни температури, як інформативного параметру.

Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено 20 зразків з найпоширеніших конструкційних сталей (Ст 20, Ст 45) товщиною 8 мм, 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, з високою вірогідністю, ініціювати зону ймовірного утворення дефекту.

Під час створення зони ймовірного утворення дефекту метал зразка може набути певних напружень із-за температурних та механічних деформацій. Тому після виготовлення зразків їх

піддають 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 машиною типу УММ-50.

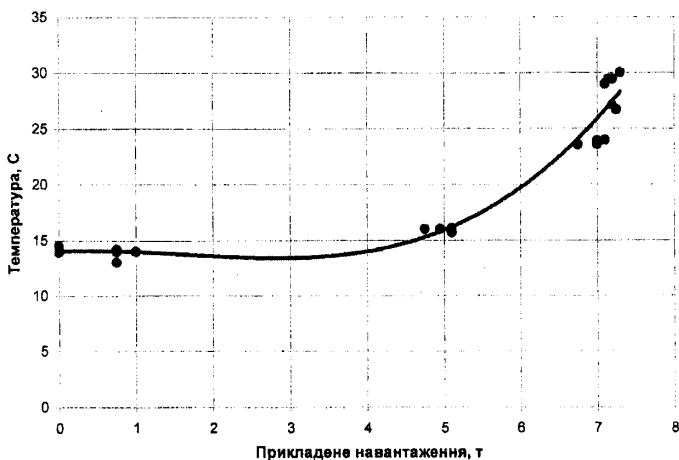
Експериментальні зразки встановлювалися у тримачі розтягуючої машини, а чутливий елемент засобу контролю закріплювався у зоні ймовірного утворення дефекту. Перед подачею навантаження засіб контролю було витримано протягом 5 хв. у ввімкненому стані з метою встановлення початкового значення температури,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

Статистичний аналіз результатів експериментальних досліджень дозволив отримати аналітичні вирази цих залежностей. За методом найменших квадратів поліномініальне рівняння регресії має вигляд:

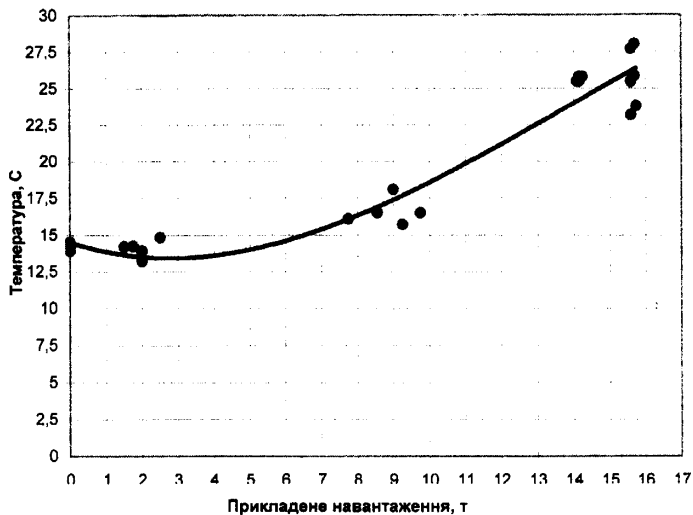
$$t = 0,0919P^3 - 0,4444P^2 + 0,301P + 14,024 \text{ для зразків виготовлених зі сталі Ст20};$$

$$t = -0,004P^3 + 0,1619P^2 - 0,814P + 14,492 \text{ для зразків виготовлених зі сталі Ст45},$$

де t – температура на поверхні зразка, P – прикладене навантаження (рис. 4 а, б відповідно).



а)



б)

• - виміряні значення температури;

— - поліноміальний розподіл температури.

Рис. 4. Залежність температури від прикладеного навантаження на поверхні об'єктів контролю: а) зразки з сталі Ст20; б) зразки з сталі Ст45

Після виявлення стрімкої зміни температури подача навантаження припинялась, а дослідні зразки перевірялись на наявність несучільностей рентгенівським та акустичними методами контролю. У зоні ймовірного утворення дефекту зразки розпилювались, а отримані розпили досліджувались за допомогою мікроскопа Carl Zeiss NU 2e.

На рис. 5 та 6 подано збільшені зображення отриманих мікрошліфів.



Рис.5. Мікрошліф зразка, виготовленого з сталі Ст20



Рис. 6. Мікрошліф зразка, виготовленого з сталі Ст45

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 автомодельності зони передруйнування; коефіцієнт масштабу, що визначає тривалість поширення мікротріщини; кількість енергії, що необхідна для самоподібного поширення мікротріщини; фрактальну розмірність дисипативної структури.

Використовуючи синергетичну модель руйнувань твердого тіла та застосовуючи підходи фрактальної геометрії, створено програмне забезпечення виконане у середовищі Borland Delphi, що дозволяє прогнозувати розвиток мікротріщини у напружено-деформованих металічних конструкціях.

На рис. 7 зображено фрагмент моделювання процесу розвитку мікротріщини у матеріалі сталь Ст45.

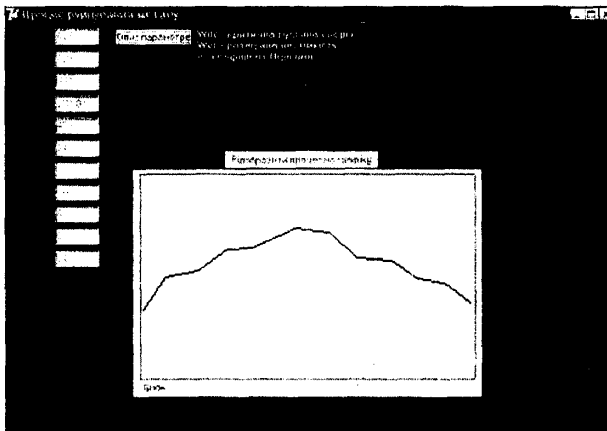


Рис. 7. Фрагмент моделювання процесу розвитку мікротріщини у матеріалі сталь Ст45

Отримані результати підтверджують, що при накопиченні напружень до певного граничного значення у металі зароджується мікротріщина. Експериментально встановлено, що

інформативним параметром, який характеризує момент зародження мікротріщини є стрибкоподібна зміна температури на поверхні зразка. Мікрошліфи підтверджують, що процеси зародження та поширення мікротріщин мають фрактальну структуру, яка володіє спектром дробових розмірностей.

У п'ятому розділі, виходячи із проведеного аналізу застосованих схемотехнічних рішень розробленої системи контролю, визначено її основні метрологічні характеристики експериментальним шляхом. Визначено точність перетворення інформативного параметру у вимірюваний сигнал та проведено оцінку зміни похибки вимірювання інформативного параметру від його величини, яка не перевищує 0,7%. Визначено ймовірність виявлення мікротріщини у напружено – деформованих конструкціях, яка становить $P=0,95$.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі, що полягає в розробці методу та засобу для контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях. Проведені дослідження дозволили зробити такі висновки:

1. На основі аналізу відомих методів контролю процесу зародження та розвитку тріщин обґрунтовано доцільність створення методу контролю процесу зародження мікротріщин та прогнозування їх розвитку у металоконструкціях під час експлуатації (перебування у напружено-деформованій 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 залягання 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 зародження та розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях. Визначено її основні метрологічні характеристики і встановлено, що похибка вимірювання температури не перевищує 0,7%.

6. На основі синергетичної моделі руйнувань, проведено оцінювання універсальних залежностей між параметрами, що описують структурні перетворення під час зародження, накопичення та розвитку мікрodefektів з застосуванням теорії фракталів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ 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. 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.
3. Габльовська Н.Я. Експериментальні дослідження зміни температури як інформативного параметру для контролю процесу розвитку мікротріщин // Приладобудування 2004: підсумки і перспективи: Збірник тез наук.-техн. конф. - Київ: ПП "ППНВ", 2004. - С. 202-203.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. 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.
9. 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.
10. Габльовська Н.Я. Оцінка точності опосередкованого контролю напружено-деформованого стану металічних конструкцій // V Міжнародна науково-технічна конференція "Метрологія та вимірювальна техніка": Наукові праці конференції у 2-х томах. – Харків, 2006. – С.97-100.
11. Луцишин Т.І., Габльовська Н.Я., Кононенко М.А. Дослідження термомеханічних властивостей металу в момент зародження мікрodefекту // Всеукраїнський щоквартальний науково-технічний журнал "Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ". – Івано-Франківськ, 2006. - №4(21). с.86-89.

АНОТАЦІЯ

Габльовська Н.Я. Вдосконалення методу 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, 2007.

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 параметру.

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: висока 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. Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджено в навчальний процес.

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

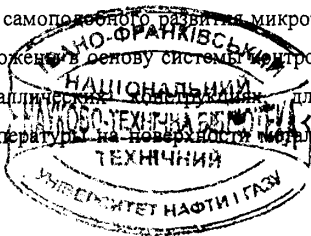
АННОТАЦІЯ

Габлєвская Н.Я. Совершенствование метода 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, 2007.

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 автосредовой 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 металлоконтрукции 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. Perfection of method of control of development of microcrackes in the tensely deformed metallic constructionsis. - 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, 2007.

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-Franckivsk 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.