

Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу

На правах рукопису

Габльовська Надія Ярославівна

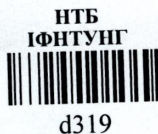
УДК 681.325

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

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу
речовин

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Чеховський С. А.,
к.т.н., професор



Івано-Франківськ - 2008р.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП | 5 |
| РОЗДІЛ 1 | 10 |
| АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ | |
| 1.1. Фізико-механічні процеси, що відбуваються в тілі напружено- деформованих металоконструкцій | 10 |
| 1.2. Аналіз існуючих підходів та теорій руйнування металоконструкцій | 12 |
| 1.3. Аналіз відомих методів неруйнівного контролю та технічної діагностики технічного стану напружено-деформованих металоконструкцій | 21 |
| 1.4. Постановка задачі досліджень | 29 |
| РОЗДІЛ 2 | 31 |
| АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ МЕТАЛУ ЯК ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ | |
| 2.1. Аналіз деформованого тіла з позиції синергетики | 31 |
| 2.2. Структурні перебудови та утворення перехідного шару в металі під дією зовнішніх навантажень з точки зору фрактальної теорії | 34 |
| 2.3. Аналіз енергетичних змін у структурі металу під час зародження мікродефектів | 45 |
| 2.4. Термодинамічна модель процесу зародження мікротріщин у напружено-деформованому тілі | 53 |
| 2.5. Вимоги до системи контролю зародження та розвитку мікротріщин у тілі напружено-деформованих металічних конструкцій | 57 |
| Висновки до розділу 2 | 64 |
| РОЗДІЛ 3 | 66 |
| РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗАРОДЖЕННЯ ТА РОЗВИТКУ МІКРОТРИЩИН У НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛІЧНИХ КОНСТРУКЦІЯХ | |
| 3.1 Обґрунтування вибору термодавача системи контролю | 66 |

| | |
|--|-----|
| 3.2 Розробка структурної схеми системи контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях | 72 |
| 3.3 Дослідження динамічних характеристик системи контролю розвитку мікротріщин у напружено – деформованих металічних конструкціях | 81 |
| Висновки до розділу 3 | |
| РОЗДІЛ 4 | 86 |
| МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ РОЗВИТКУ МІКРОТРИЩИН У НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛІЧНИХ КОНСТРУКЦІЯХ | 87 |
| 4.1. Визначення метрологічних характеристик розробленої системи контролю | 88 |
| 4.1.1. Визначення точності перетворення інформативного параметра у вимірювальний сигнал | 88 |
| 4.1.2. Оцінка зміни похибки вимірювання інформативного параметра від його величини | 96 |
| 4.2. Визначення основних показників контролю утворення мікродефектів | 100 |
| Висновки до розділу 4 | |
| РОЗДІЛ 5 | 103 |
| ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ РОЗВИТКУ МІКРОТРИЩИН НА РЕАЛЬНИХ ЗРАЗКАХ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ | 105 |
| 5.1 Лабораторні дослідження динамічних характеристик системи контролю розвитку мікротріщин у напружено – деформованих конструкціях | 106 |
| 5.2 Експериментальні дослідження процесу зародження та розвитку мікротріщин з використанням реальних зразків | 108 |
| 5.3 Визначення параметрів, що описують процес руйнування металу, з застосуванням фрактальної механіки руйнувань | 116 |
| 5.3.1. Знаходження кількості енергії, що необхідна для самоподібного росту мікротріщини | 117 |

| | |
|---|-----|
| 5.3.2. Знаходження коефіцієнту масштабу, що визначає тривалість росту мікротріщини, яка здатна самоподібно поширюватись | 120 |
| 5.3.3 Знаходження максимального розміру автотодельності зони передруйнування та критичного розміру мікротріщини, яка має властивість до самоподібного поширення | 122 |
| 5.3.4 Знаходження фрактальної розмірності дисипативної структури | 126 |
| 5.4 Критерії руйнування, що відображають колективні ефекти при пластичній деформації та самоорганізацію дисипативної структури | 129 |
| Висновки до розділу 5 | |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 133 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 135 |
| ДОДАТКИ | 137 |
| | 149 |

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний стан парку металоконструкцій і обладнання, що експлуатується в нафтогазовій промисловості, 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, дослідженню взаємозалежностей яких присвячено цілий ряд робіт, які дозволили встановити основні параметри контроль яких дозволяє здійснювати дефектоскопію з високою вірогідністю. Це насамперед роботи

Дж.Коллинза, М.Н.Михеева, Г.Я.Безлюдько та ін. В значній мірі ці роботи були передумовою створення систем контролю, які базуються на теплових методах. Це роботи Іванової В.С., Федорова В.В., Панина В.Е., Баланкіна А.С. та ін. Однак, вказані роботи носять, в основному, аналітичний характер, а їх результати не привели до створення систем контролю, використання яких було б можливе в умовах промислового застосування напружено-деформованих конструкцій, для оцінки їх стану. Це пов'язано з тим, що в цілому такий контроль є багатопараметричним та малоінформативним в плані прийняття рішення щодо реального стану металу конструкції.

Отже, задача розробки та створення системи опосередкованого контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій, що дозволяє 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 вимірювальна 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 дозволяє 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 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.), 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

1.1. Фізико-механічні процеси, що відбуваються в тілі напружено-деформованих металоконструкцій

Напружено-деформовані металоконструкції є складовою практично всіх використовуваних у даний час виробів та споруд різноманітного технологічного призначення. Особливо важливо здійснювати контроль технічного стану таких конструкцій в нафтогазовій промисловості, оскільки саме тут формується чи не найбільш широкий спектр у застосуванні різноманітних металічних виробів.

Видобуток нафти та газу в Україні на даний час пов'язаний з використанням уже освоєних родовищ та розвідкою і розробкою нових. Національні програми "Нафта і газ України до 2010 року", "Державна програма розвитку робіт з видобутку нафти і газу в українському шельфі Азовського та Чорного морів", "Створення та організація виготовлення бурового, нафтопромислового, нафтопереробного устаткування і техніки для будівництва нафтопроводів з науково-технічною частиною на період до 2010 року" передбачають значне збільшення обсягів і темпів спорудження нафтових і газових свердловин за їх оптимальної собівартості, виготовлення конкурентоздатного обладнання та дотримання вимог екологічної та експлуатаційної безпеки.

У ході виконання вказаних робіт 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, тощо [1].

Поява сучасних великих об'єктів: нафтових та газових терміналів, нафтогазопроводів, морських бурових установок призвела до великих негативних наслідків у випадку виходу їх з ладу.

За кількістю аварій в нафтогазовій галузі Україна займає одне із перших місць в Європі. На більшості підприємств України велика частка обладнання та інструменту, що знаходяться в експлуатації, відпрацювало свій нормативний термін. Підприємства, з одного боку, через економічну нестабільність не в змозі провести повну його заміну, а з іншого – формальний підхід до списання чи заміни обладнання, який мав місце раніше, є не зовсім правильним. Експлуатаційникам важливо знати фактичний технічний стан обладнання, залишковий ресурс і термін, який зможе працювати дане обладнання без відмов. Саме такий підхід має широке застосування в передових компаніях світу.

В переважній більшості нафтогазовидобувне обладнання – це металеві конструкції, які постійно знаходяться під дією різного роду зовнішніх сил (навантажень) та фізичних полів.

В Україні існує густа мережа магістральних трубопроводів, лінійна частина яких експлуатується у складних і досить різноманітних природних умовах, має різне конструктивне рішення та різні терміни експлуатації (понад 34 роки – 16,21%, від 24 до 33 років – 14,88%, від 14 до 23 років – 28,21%, до 13 років – 40,7%) [1]. Найбільша кількість аварій (до 80%) припадає на лінійну частину трубопроводів. Це призводить не тільки до значних економічних збитків, але й до значного травматизму.

Стан у якому перебувають металічні конструкції під час експлуатації можна охарактеризувати як напружено-деформований, що супроводжується зміною фізико – механічних характеристик металу, а також, зміною перебігу енергетичних перетворень та зародженням несучільностей у структурі металу, що здатні, під впливом зовнішніх факторів перебудовуватись, утворюючи при цьому зародки дефектів.

Відповідність фізико-механічних і геометричних характеристик нормативним значенням і відсутність дефектів, типу порушення суцільності матеріалів конструкцій, визначає їх технічний стан.

До найпоширеніших дефектів нафтогазового обладнання слід віднести несцільності типу тріщин, які є різні за характером структурних змін та розміром (від субмікроскопічних – порядку декількох ангстрем, до магістральних – порядку міліметрів чи сантиметрів). Внаслідок зменшення навантаження тріщина може перебувати у стійкому незмінному стані, та при подальшому навантаженні чи локальному підсиленні його дії тріщина розвиватиметься, а при певному впливі декількох діючих факторів її розвиток буде носити лавиноподібний характер, що в подальшому призведе до швидкого руйнування деталі конструкції. Тому контроль утворення та розвитку дефектів у нафтогазових об'єктах є важливою народногосподарською задачею.

1.2. Аналіз існуючих підходів та теорій руйнування металоконструкцій

Механічне руйнування конструкцій може бути визначене як будь-які зміни розмірів, форми та властивостей матеріалу конструкції чи окремої її деталі, в результаті яких вона втрачає здатність задовільно виконувати наперед задані функції. Для опису процесу руйнування застосовуються різні підходи та теорії.

Оскільки руйнування пов'язане з утворенням нових поверхонь, увага, під час розрахунків пов'язаних з руйнуванням, приділяється поверхневій енергії. Теоретичну міцність матеріалів за зміною поверхневої енергії визначають за формулою [2]:

$$\sigma_{теор} = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\alpha}}, \quad (1.1)$$

де E – модуль Юнга;

γ - поверхнева енергія, пов'язана з утворенням нової поверхні ;

α - відстань між атомними площинами в кристалічній ґратці.

Одне з перших обґрунтувань цього виразу для аморфних тіл (зокрема скла) розвинув А.Гріффітс (теорія руйнування А.Гріффітса), який припустив наявність у матеріалі тріщин, в усті яких напруження піднімаються вище теоретичної міцності, внаслідок чого, можливе їх поширення. Розрахунок розподілу напружень в такій тріщині показав [3], що в результаті наявності тріщини, пружна енергія зменшується на величину

$$\Delta E = \pi(1-\nu) \cdot \sigma^2 \cdot c^2 / 8 \cdot G, \quad (1.2)$$

де G – модуль зсуву;

ν - коефіцієнт Пуасона;

c – довжина тріщини;

σ - напруження, нормальне до площини двовимірної тріщини.

А.Гріффітс виходив з того, що тріщина здатна поширюватись тільки у тому випадку, якщо вільна енергія системи в результаті її поширення зменшується, тобто зменшення потенціальної енергії деформації перевищує приріст поверхневої енергії тріщини [3]. На основі цієї умови отримав наступну залежність між критичною величиною тріщини (так звана тріщина А.Гріффітса), яка має еліптичну форму, і напруженням необхідним для її поширення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot c}}, \quad (1.3)$$

де c – довжина тріщини;

σ -напруження.

Розрахунок, проведений для випадку більш ймовірної форми тріщини з товщиною устя порядку міжатомної відстані довів, що результат є несуттєво відмінним від (1.3).

Орован [2] розвинув теорію руйнувань А.Гріффітса, враховуючи особливості природи пластичної деформації у металах. Для цього він вважав за необхідність врахувати енергію пластичної деформації шару, що прилягає до поверхні руйнування. Величина цієї енергії у 10^3 разів більша за величину поверхневої енергії у формулі (1.3). За Орованом

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot p}{\pi \cdot c}}, \quad (1.4)$$

де p – енергія пластичної деформації поверхневого шару, яка залежить від умов випробувань.

Для обґрунтування розбіжності між теоретичною та практичною міцністю металів існувала і наступна концепція. Так, А.В.Степанов висловив припущення, що цю розбіжність можна пояснити наявністю дефектів, що утворюються під час розтягу в процесі пластичного течіння. Згідно теорії Я.І.Френкеля, міцність не визначається існуючими в тілі тріщинами. На міцність тіла впливають тріщини, що утворюються в процесі прикладеного навантаження. У роботі [4] підтверджено точку зору, що руйнування є наслідком процесу пластичної деформації, яка необхідна для утворення мікротріщин.

Уявлення, що руйнування є наслідком пластичної деформації, лежать в основі дислокаційної теорії руйнувань. Ще в 1948р. К.Зинер показав, що релаксація напружень зсуву всередині смуги ковзання, яка утворюється в процесі пластичної деформації, призводить до появи напружень перед вістрям смуги ковзання. Після зупинки смуги ковзання біля границі зерна або пластинки твердої фази, відбувається подальша релаксація напружень всередині смуги ковзання, внаслідок чого напруження перед її вістрям продовжує збільшуватись і може досягнути теоретичної міцності, після чого відбувається утворення тріщини. Подальша релаксація напружень призводить до поширення тріщини. К.Зинер показав, що з точки зору механізму пластичної деформації, така зупинка смуги ковзання перед завадою еквівалентна утворенню дислокаційного скупчення. Дислокаційна теорія руйнування дозволила отримати задовільні залежності між напруженням руйнування, нижньою границею плинності і розміром зерна. З точки зору дислокаційної теорії, тріщини Гріффітса в металах утворюються в результаті пластичної деформації.

За даною теорією необхідно враховувати, що дотичні напруження контролюють першу стадію крихкого руйнування – стадію зародження тріщин Гріффітса, розвиток яких відбувається за рахунок нормальних напружень.

Довжина тріщини Гріффітса обернено пропорційна величині нормального напруження і визначається за допомогою рівняння (1.3). Довжина тріщини Гріффітса в умовах тривісного напруженого стану, внаслідок підвищеного нормального напруження, значно менша, ніж в умовах одновісного напруженого стану. Це означає, що якщо в умовах одновісного напруженого стану поширення тріщини зупиняється, внаслідок протікання процесів пластичної деформації, і тріщина не може досягнути розмірів тріщини Гріффітса, необхідної для крихкого руйнування, то в умовах тривісного напруженого стану досягнення тріщиною довжини тріщини Гріффітса, внаслідок меншої довжини останньої, не гальмується пластичною деформацією, що призводить до крихкого руйнування [2].

В 70-х роках почався інтенсивний процес переусвідомлення і розвиток науки про міцність твердих тіл всупереч тому, що дане питання вважали, практично, до кінця вивченим і завершеним. Даний процес був викликаний, перш за все, новим підходом до руйнування тіл – кінетичним, при якому, у повній мірі, враховується тепловий рух атомів і молекул.

Для кількісної оцінки реакції тіл на механічну дію поряд з поняттям про границю пружності та плинності було введено уявлення про міцність, як характеристику деякого граничного, критичного стану навантаженого тіла. Механічний підхід до проблеми руйнування зберігся і в подальшому, коли тверде тіло почали розглядати як конструкцію з атомів, пов'язаних силою зчеплення.

Передумовою до формування уявлень кінетичної концепції руйнування стали, окрім загальнотеоретичних міркувань, роботи по вивченню деформаційних властивостей твердих тіл та релаксаційних явищ.

Основним поштовхом для розвитку кінетичної теорії механічного руйнування вважають експериментальні дані про часову та температурну залежність міцності твердих тіл. Було відмічено, що практична міцність матеріалів суттєво змінюється в залежності від умов досліджень. Однак, одержані дані експериментальних досліджень не одержали належного

розвитку [3]. Постало питання у вивченні впливу часу дії напруження критичної величини на границю міцності матеріалу. Прихильники уявлення про критичний характер руйнування для пояснення часової залежності робили припущення про наявність передуючих або супроводжуючих руйнуванню процесів, завдяки яким міцність залежить від часу дії навантаження.

У [4] наведено залежність міцності від часу дії навантаження за рахунок хімічної дії на матеріал оточуючого середовища. Існувало припущення про в'язко-пружну гетерогенність твердих тіл як загальну причину залежності міцності від часу. В гетерогенній системі перерозподіл напружень буде відбуватись до того часу, поки напруження на пружних елементах не досягне границі міцності матеріалу, що призведе до руйнування. Дані міркування вказують на кінетичний характер процесу деформування, але спростовують кінетичну природу процесу руйнування.

Існуючі протиріччя у вченнях про міцність могли вирішуватись з позиції розгляду руйнування як самостійного кінетичного процесу. В результаті проведених багаточисельних експериментів було показано, що часова залежність міцності – не унікальне, а широко поширене явище, характерне для руйнування, різних по природі і фізико-хімічних властивостей, твердих тіл. Саме результат цих досліджень був вирішальним у формуванні кінетичної концепції механічного руйнування.

При кінетичному підході, на відміну від статичного, руйнування розглядається як реальний процес, що розвивається у часі (процес накопичення несучільностей). Тому доцільно характеризувати його або швидкістю накопичення несучільностей, або часом, за який процес розвивається до визначеної стадії і призводить до руйнування. Найбільш простою характеристикою міцнісних властивостей матеріалу, що відображає у той же час кінетичну природу процесу руйнування, є величина довговічності твердих тіл t під напруженням σ , тобто час існування зразка у напруженому стані з моменту прикладення навантаження до руйнування. З точки зору кінетичної концепції руйнування довговічність є фундаментальною характеристикою механічної

міцності матеріалу. Її можна розглядати як величину обернено пропорційну усередненій швидкості \bar{v} процесу руйнування, тобто $\tau \sim 1/\bar{v}$.

Для характеристики міцнісних властивостей того чи іншого матеріалу з точки зору кінетичного підходу, необхідно мати відомості про залежності довговічності зразків з даного матеріалу від прикладеного напруження σ . Ці ж відомості дозволяють зробити висновок про природу міцності.

Результати експериментальних робіт дослідників [5] призвели до встановлення загальних закономірностей для твердих тіл, які пов'язують довговічність τ з діючим напруженням σ і температурою T . Те, що з часом в навантаженому тілі дійсно проходять процеси поступового накопичення руйнування, було доведено експериментами з перериванням дії навантаження. Виявилось, що після перебування протягом деякого часу під навантаженням зразок стає ослабленим: його подальша довговічність знижується.

Для вияснення природи процесів, що призводять до руйнування тіла, було досліджено вплив температури на довговічність матеріалу, що знаходиться під дією навантаження. Встановлено, що пучок лінійних залежностей $\lg \tau - \sigma$ при різних температурах – це пучок прямих, що перетинаються в одній точці – полюсі. Для всіх типів твердих тіл цей пучок знаходиться практично при одному і тому ж значенню довговічності. Експериментальні залежності між довговічністю τ , діючим напруженням σ і температурою T дозволили встановити аналітичні співвідношення між цими величинами [5].

Виявилось, що довговічність твердих тіл підпорядковується виразу:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U(\sigma)}{k \cdot T}\right), \quad (1.5)$$

де $U(\sigma) = U_0 - \gamma \cdot \sigma$;

k – стала Больцмана;

T – абсолютна температура.



Всі наступні висновки про природу руйнування твердих тіл витікають з аналізу виразу (1.5), який за [5] є основним рівнянням довговічності.

Розрив міжатомних зв'язків, за кінетичною концепцією міцності, здійснюється фактичними тепловими флуктуаціями, а не дією напруження. Але роль механічного напруження надзвичайно велика в кінетичній системі.

Флуктуації при відсутності зовнішнього навантаження викликають в різних об'ємах твердого тіла розриви міжатомних зв'язків. Але ці розриви ліквідуються за рахунок рекомбінації розірваних зв'язків. Прикладене до тіла розтягувальне навантаження не тільки зменшує енергію розпаду зв'язків і цим збільшує ймовірність появи флуктуації, достатньої для розірвання зв'язку, але також і різко послаблює можливість рекомбінації, віддаляючи один від іншого роз'єднані атоми [6]. Отже, за кінетичною теорією, безпосереднім руйнівним фактором є теплові флуктуації. Енергія руйнування черпається, у значній мірі, з накопиченої теплової енергії тіла, а не тільки з роботи зовнішніх сил. Зовнішня сила відіграє роль вентиля, полегшуючи і направляючи теплові флуктуації.

Висновок про вирішальну роль теплових флуктуацій в процесі механічного руйнування складає основне пізнавальне значення праць по вивченню кінетичної природи руйнувань.

До теперішнього часу сформувалось два напрямки в розробці термодинамічної теорії руйнувань. Один із них пов'язаний з застосуванням ентропії [7], а інший – густини внутрішньої енергії [8 - 10]. Обидва напрямки адекватні при накладанні деяких обмежень на зовнішні умови, так як під час цього використовуються критичні значення термодинамічної функції Гіббса (максимальна ентропія) або максимальне значення густини енергії деформації як критерію досягнення нестійкості системи. Застосування параметрів термодинаміки рівноваги для опису такого нерівноважного процесу, як руйнування, можливе при застосуванні принципу лінійної рівноваги, розвинутого Г.П. Гладишевим [11]. В термодинаміці нерівноважних процесів, частіше за все, застосовується ентропійний підхід, в основу якого покладено рівняння балансу ентропії.

Розгляд руйнування з ентропійної точки зору потребує визначення функції стану і локальної дисипативної функції. Вирішення цієї задачі розглянуто в [12]

з врахуванням величини ентропії в одинично малому об'ємі деформованого твердого тіла в залежності від діючих в ньому процесів. Термодинамічні умови відсутності або завершення будь-якого процесу в елементі об'єму прийняті однаковими, але вони відрізняються часом тривалості процесу. В [12] визначені локальні функції стану, ентропійні критерії руйнування, локальна дисипативна функція. Зроблено висновок, що на основі отриманих розв'язків можна оцінити час до руйнування твердих тіл при механічному навантаженні.

Із термодинамічних теорій руйнування, що базуються на густині енергії деформації, що визначається на основі термодинамічних констант, найпоширенішою є ергодинамічна теорія В.В.Федорова [7, 9]. Теорія дозволяє розраховувати поля пошкоджень твердого тіла, що деформується, визначати градієнти пошкоженості. Результати з дослідження руйнування металів і сплавів на основі ергодинамічної теорії міцності з використанням термодинамічного критерія руйнувань – густини внутрішньої енергії, наведено в [7]. Відзначено, що відповідність чисельного значення критичної густини внутрішньої енергії значенню ентальпії плавлення підтверджує, що локальні об'єми, які відповідають за руйнування, знаходяться в квазіаморфному стані, а між процесами механічного руйнування і плавлення існує структурно-енергетична аналогія.

В останні роки почала розвиватись така наука, як синергетика. Синергетика займається вивченням процесів самоорганізації, стійкості, розпаду структур різної природи, що формуються в дисипативних середовищах. Термін "синергетика" ввів Г.Хакен [13], що походить від грецького "синергос" – взаємодія, колективний ефект. Процеси самоорганізації, стійкості і розпаду різноманітних структур в системах, далеких від рівноваги, є загальними для живої та неживої природи. Дана загальність полягає у тому, що біологічним, хімічним, фізичним та іншим процесам, які протікають далеко від термодинамічної рівноваги, властиві нерівноважні фазові переходи, що відповідають особливій точці (точці біфуркації), під час досягнення якої проходить спонтанна зміна властивостей середовища, зумовлена зміною

дисипативних структур. Уявлення про дисипативні структури ввели Г.Ніколіс і І.Прігожин [14]. Рушійною силою явища самоорганізації дисипативних структур під час нестационарних процесів є прагнення відкритих систем до зниження виділення ентропії. Дисипативні структури формуються в процесі обміну енергією системи з зовнішнім середовищем. Синергетика розглядає динаміку цих процесів, де вирішальним фактором є час. Тобто, саме синергетика здатна описати еволюцію системи від початку дії на неї навантаження до остаточного руйнування.

Спонтанне утворення дисипативних структур визначає порушення симетрії, а це можливе тільки у відкритих системах, що обмінюються енергією з зовнішнім середовищем. Цей феномен привернув увагу спеціалістів різних галузей, зокрема фахівців з технічної діагностики та неруйнівного контролю. Цей напрямок став особливо актуальний з розвитком теорії фракталів і фрактальної розмірності у фізиці твердого тіла [15, 16]. Теорія фракталів є базовою для кількісного опису дисипативної структури за допомогою фрактальної розмірності.

Об'єднання синергетичних підходів з теорією фракталів дозволяє наблизити вирішення найбільш актуальних завдань по встановленню взаємозв'язку між мікро- і макрохарактеристиками міцності матеріалів.

До систем, що у повній мірі володіють дисипативними та самоподібними характеристиками слід віднести металоконструкції у напружено-деформованому стані. Характер перебігу деформаційних процесів у матеріалі, з якого виготовлена дана конструкція, можна описати як динамічну систему, з перерозподілом хімічних, фізичних та енергетичних процесів під час структурних перетворень під дією різного роду фізичних полів [17, 18]. Враховуючи нерівноважні фазові переходи та кристалічну структуру матеріалу, з точки зору теорії фракталів слід розглядати процес зародження, накопичення та поширення несучільностей у матеріалі, як дисипативний процес, характеризуючи його зміною фрактальної розмірності та відповідними енергетичними змінами.

Отже, метою даної роботи є дослідження структурно-фазових перетворень у металі конструкції нафтогазового обладнання, що перебуває у напружено-деформованому стані, з застосуванням синергетичних підходів та фрактальної механіки руйнувань, визначення залежностей між параметрами, що найбільш повно характеризують процеси зародження, накопичення та поширення несуцільностей структури матеріалу, від прикладеного навантаження, а також розробка та створення системи контролю розвитку мікротріщин з застосуванням визначених інформативних параметрів моменту зародження несуцільностей (мікродефектів).

1.3. Аналіз відомих методів неруйнівного контролю та технічної діагностики технічного стану напружено - деформованих металоконструкцій

Аналіз фактичного технічного стану металічної конструкції під час експлуатації дозволяє визначати зміну ступеня працездатності і дозволяє здійснити прогнозування її робочого ресурсу.

Основним параметром, який необхідно контролювати за допомогою існуючих методів, є момент утворення мікродефекту та енергетичні зміни, що спостерігаються під час структурних перетворень та виникнення несуцільностей в металі, з якого виготовлена деталь конструкції.

Необхідно зазначити, що фізико-механічні властивості одного і того ж металу можуть суттєво відрізнятися завдяки впливу умов експлуатації та інших діючих факторів. Для того, щоб говорити про методи визначення фізико-механічних характеристик металів, потрібно коротко ознайомитись з переліком параметрів, які входять до множини досліджуваних: модуль пружності, модуль зсуву; коефіцієнт Пуассона; границя міцності; межа плинності; внутрішні напруження; поверхнева енергія; фізична густина; анізотропія металу; розмір кристалу та ін.

Очевидно, що для оцінки фактичного технічного стану металічної конструкції найбільш важливими є міцнісні характеристики і параметри структури металу, оскільки саме вони є найбільш узагальненими і в достатньо повній мірі дають можливість аналізувати фактичний стан даної конструкції.

Максимальне значення напружень визначає здатність чинити опір руйнуванню, яку приймають за міру міцності [19]. Однак, на практиці, для визначення максимального рівня робочих навантажень часто використовують поняття межі плинності, що пов'язане з границею міцності.

Одним із методів дослідження металоконструкції у напружено-деформованому стані є теоретичний метод. Він ґрунтується на математичній моделі процесу навантаження металічної конструкції. Але за допомогою вказаного методу, практично, неможливо врахувати вплив як окремих, так і специфічних діючих факторів. А це приводить до значних похибок в розрахунках [20], що не дає можливості одержати необхідні висновки про об'єктивні зміни стану металічної конструкції. Також, не завжди можливо врахувати вплив всіх діючих факторів та їх взаємозв'язок. Тому застосування даного методу для оцінки зміни структурних перетворень в матеріалі металічної конструкції у напружено-деформованому стані є недостатньо повним. Визначення внутрішніх сил, що виникають в металі під дією різних видів навантажень, вимагає даних про зміну міцнісних характеристик того ж металу, що в умовах тривалої експлуатації є, практично, неможливим.

Зміну стану металічної конструкції під час експлуатації можна визначити за допомогою візуального огляду. Даний метод дозволяє встановити зміну поверхні металу, а саме здуття, розшарування, розтріскування, види корозійного пошкодження та інші видимі дефекти, і дозволяє провести якісну оцінку стану поверхні металу та визначити напрямки контролю. До основних недоліків цього методу можна віднести неможливість отримання кількісної характеристики стану металічної конструкції та суб'єктивізм результатів контролю.

Складовою частиною робіт з визначення зміни механічних характеристик є товщинометрія металу, тому що міцнісні характеристики є функціонально залежними від товщини металу [21].

Існують, також, хімічний та електрохімічний методи, що дають можливість ідентифікувати склад металу, виявити анодні і катодні зони в умовах корозії металу, геометричні включення, які виходять на його поверхню. Основним недоліком вказаних методів є те, що їх неможливо застосовувати під час перебування металічної конструкції під впливом вібрації, так як дані методи потребують нанесення на випробовувану поверхню розчину крапельним способом. За допомогою даних методів неможливо визначити внутрішні дефекти. Результати, що отримано за допомогою даних методів, використовують для дослідження фізико-механічних властивостей металу в лабораторних умовах.

В практиці неруйнівного контролю і дослідження металів існує ряд методів для визначення фізико-механічних характеристик та контролю напружено-деформованого стану конструкцій.

Найбільш ефективним для проведення досліджень напружено-деформованого стану прийнято апаратний метод контролю. Для контролю статичних та динамічних навантажень на практиці застосовують такі методи: тензометричні, рентгенівські, поляризаційно-оптичні (методи фотопружності).

Суть вимірювання напружень рентгенівським методом полягає у визначенні міжатомних відстаней у кристалічній ґратці матеріалу конструкції, що знаходиться під дією напружень [22]. До переваг даного методу можна віднести можливість досліджувати поля напружень з великими градієнтами і малою базою вимірювань без еталонних зразків.

Існує ряд недоліків, що знижують широке застосування цього методу. До них відноситься: низька точність вимірювань, можливість застосування його тільки в лабораторних умовах, коли вимірювання можна виконати на малих зразках і базах; дослідження даним методом металічної конструкції під час експлуатації вимагає великих затрат часу і засобів, а також є дуже складною

технічною процедурою, яку важко реалізувати. В свою чергу, портативні прилади контролю є досить дорогими і малоінформативними, оскільки розшифрування рентгенограм проводиться у лабораторних умовах.

До недоліків ще можна віднести й те, що за допомогою даного методу можна контролювати тільки одновісний напружений стан металу, в той час, як під впливом зовнішніх діючих факторів, напружено-деформований стан конструкції під час експлуатації буде більш складним.

Рентгенівські методи застосовують, в основному, для структурного аналізу, а для визначення фізико-механічних характеристик можуть бути використані тільки як допоміжні [23].

У роботах [24, 25] показано, що доцільним є використання тензометричного методу, в якому вихідним параметром, що оцінюється, є зміна імпедансу перетворювача.

Найбільш широко, як тензометричні перетворювачі, використовують тензорезистори, принцип роботи яких базується на використанні лінійної залежності величини зміни омичного опору тензорезистора від величини деформації. До переваг тензорезисторів можна віднести можливість дистанційних замірів у великій кількості точок, а також, проведення вимірювань в широкому діапазоні температур при самотермокомпенсації чи автосхемній компенсації, можливість проведення вимірювань при різних зовнішніх експлуатаційних умовах, а основне - вимірювання багатокomпонентних деформацій на локальних ділянках об'єкту дослідження.

Але, не зважаючи на велику кількість переваг, тензорезистори мають ряд значних недоліків. Дані первинні перетворювачі реєструють лише зміну деформованого стану об'єкту, а не процес зародження мікрodefекту, коли перебіг деформаційних процесів не піддається однозначній кількісній оцінці.

Для вирішення задач контролю фізико-механічних характеристик металу можна використовувати магнітні методи контролю, а саме метод коерцитиметрії та імпульсно-локальний метод [25 - 27]. Метод коерцитиметрії базується на тому, що в кожному типі конструкцій існують характерні місця втомного

переддефектного стану металу і ці місця можуть бути визначені за зміною коерцитивної сили вздовж об'єкту дослідження. В [28, 29] викладено основні підходи до реалізації методу контролю втомного стану металоконструкції в зонах концентрації напружень, в яких експлуатаційна втома розвивається і накопичується випереджальними темпами. Місцезнаходження зон концентрації напружень передбачені самою конструкцією та видами навантажень, що обумовлені режимами експлуатації даної конструкції згідно законів та принципів теоретичної механіки та опору металів.

Окрім того, розміри зон концентрації навантажень значні і суттєво перевищують розміри одиничного дефекту. Отже, ці зони можна виявляти за приростом коерцитивної сили металу. Приріст коерцитивної сили для конструкційних сталей широкого застосування становить 200...300% в період розвитку втомних явищ. Даний метод дозволяє кількісно і якісно оцінювати втомні зміни у металі в процесі його експлуатації і без руйнування конструкції. Але вказаний метод має ряд очевидних недоліків, а саме:

- в нормативних документах на сталі, магнітні характеристики не нормуються - це пояснюється явищем залишкової і спонтанної намагнічуваності, гістерезисом, нелінійністю зв'язків між ними, складністю проведення вимірювань, тощо [23];

- коерцитивна сила, як магнітна характеристика металу, є анізотропною величиною;

- низька чутливість, тобто мала зміна коерцитивної сили при зміні відносної одиниці напружень металоконструкції.

Суть імпульсно-локального магнітного методу контролю фізико-механічних властивостей полягає в тому, що металоконструкцію намагнічують полюсом постійного магніту або електромагніту по нормалі до поверхні і визначають величину залишкового магнітного поля, яка, внаслідок великого розмагнічування, пропорційна коерцитивній силі матеріалу, що контролюється [30]. Недоліками даного методу є: залежність величини вимірюваного градієнта залишкового магнітного поля від властивостей намагнічування середовища;

вплив якості магнітного контакту з об'єктом контролю на результати вимірювань.

Розглянемо контроль міцнісних характеристик металу за допомогою акустичних методів [23], які ґрунтуються на залежності інформативних параметрів ультразвукового сигналу від фізико-механічних характеристик металу.

Адекватною характеристикою оцінки внутрішньої структури чи стану матеріалу виступають акустичні параметри матеріалу. Однорідність структури матеріалу характеризується однорідністю просторового розподілу акустичних параметрів, а ізотропність фізичних чи механічних властивостей матеріалу – ізотропністю просторового розподілу характеристик акустичних параметрів і навпаки. Локальні порушення внутрішньої структури можуть виступати як концентратори напружень і мають тенденцію до розвитку у відповідні відчутні дефекти під дією експлуатаційних навантажень.

Напружено-деформований стан в об'ємі виробу приводить до анізотропії акустичних властивостей. Просторові зміни їх при просторово неоднорідному напружено-деформованому стані мають слабоконтрасний плавноміний характер, так, небезпечно напружені області за акустичними характеристиками (швидкостями поширення різних типів ультразвукових хвиль) відмінні від ненапружених – на десяти долі відсотка. Прогнозувати за параметрами акустичних хвиль поведінку металу при великих напруженнях і деформаціях аналітично неможливо [31], тому постає проблема пошуку кореляційних залежностей акустичних параметрів від міцності металу.

Найбільш інформативним акустичним параметром вважають швидкість поширення хвиль і ступінь загасання ультразвуку в металах [32]. Швидкість поширення ультразвуку аналітично пов'язана з пружними константами, які описують початкову ланку кривої "напруження-деформація". Для визначення несучільностей та фізико-механічних характеристик застосовується вимірювання ступені загасання ультразвуку в металах, але відомо, що в металах і сплавах загасання неоднозначно залежить від кристалічної структури [28].

Вже в низькочастотному діапазоні основна частина загасань ультразвуку спричинена втратами енергії за рахунок розсіювання хвиль на окремих кристалах. Тому даний метод контролю фізико-механічних характеристик є занадто складний і часто неоднозначно залежить від вимірних параметрів, навіть при умові, коли акустичний контроль досить добре теоретично обґрунтований і реалізований в багатьох технічних засобах.

Поряд з неруйнівними методами контролю є можливим досліджувати зміни в структурі поверхні металу методом атомно-силової мікроскопії, чому присвячені роботи багатьох дослідників [33 - 37].

Автори [33] висвітлюють методику вивчення механічних властивостей тонкої плівки за допомогою методу атомно-силової мікроскопії, яка дозволяє здійснити наноідентифікацію на плоских поверхнях, зберігаючи, при цьому, високу відтворюваність результатів.

У [38] наведено методику та результати експериментальних досліджень з вивчення властивостей фотоплівки за допомогою атомно-силової мікроскопії, що дозволяє отримувати чітке тривимірне зображення покриття плівки на глибині 42,5 нм та 77,4 нм. Під час дослідження різних типів фотоплівок використовувались методи застосування атомно-силового мікроскопу при різних його потужностях. За допомогою даного методу визначали модуль пружності та щільність поверхні плівки. Однак, в роботі [37] доведено, що метод атомно-силової мікроскопії доцільно застосовувати на глибині, що не перевищує 100 нм. Результати експериментальних досліджень термічно деформованої плівки підтвердили, що на глибині більше 100 нм, застосування даного методу дозволяє отримати тільки часткове відновлення нанограми.

В свою чергу, у [39] запропоновано застосування об'єднаних методів атомно-силової мікроскопії та наноідентифікаційної системи з силіконовим наконечником та діамантовим індентором. Таке поєднання дає змогу отримувати надчіткі топографічні знімки, що застосовується при дослідженні матеріалів з чіткою мікроструктурою.

Однак, даний метод не дозволяє оцінити внутрішню структуру та властивості металу, оскільки, за своєю суттю, він призначений для аналізу поверхневих та підповерхневих шарів.

Для підтвердження результатів неруйнівних методів контролю виявлення мікрodefektів та структурних змін у металах, що перебувають у напружено-деформованому стані, застосовуються металографічні методи, які потребують вирізання зразків металу з діючого обладнання. Це дозволяє визначити зміни в структурі металу на будь-якій стадії експлуатації конструкції. Випробування на твердість і мікроструктурні дослідження можуть проводитись тільки в лабораторних умовах. Вирізання зразків металу для таких досліджень знижує міцнісні характеристики металічної конструкції в цілому і тому застосовуються тільки в окремих випадках структурного аналізу поверхневих та підповерхневих шарів.

Проведений аналіз методів показує орієнтованість більшості з них на дефектоскопічні критерії оцінки стану металу, а не на діагностику та прогнозування зародження та розвитку мікрodefektів в металоконструкціях. Відомо [40], що втомні дефекти металу, які сучасна дефектоскопія здатна виявити, виникають, як правило, на заключній стадії строку служби конструкції.

Як свідчить світова практика, сьогодні для розв'язання задач діагностики конструкцій та виробів надзвичайно актуальною є проблема вивчення механізмів і здійснення кількісної оцінки процесів зародження та розвитку мікро- та макротріщин в області пластичних деформацій конструкційних матеріалів. Адже саме там відбуваються початкові стадії зародження руйнування, які є найтривалішими процесами у ланцюгу "пошкодженості – субкритичний ріст макротріщин – завершальна стадія руйнування". Методи кількісної оцінки об'ємної пошкодженості матеріалу в області його пластичних деформацій в даний час розвинуті недостатньо. Поряд із цим ще навіть не вироблено єдиної думки щодо найінформативнішого підходу, тому часто в залежності від вибраного параметра, якому ставиться у відповідність міра пошкодженості і спосіб її інтерпретування, отримують, відповідно, і різні

значення шуканих величин. Суттєвий внесок у розв'язання окресленої проблеми може дати розвиток методів і засобів, котрі ґрунтуються на використанні сучасних досягнень механіки руйнування та нових фізичних досліджень [23, 41].

Отже, створення нових опосередкованих методів та систем контролю процесу зародження мікрodefektів та прогнозування їх розвитку у металоконструкціях під час експлуатації (перебування у напружено-деформованій стані), використовуючи нетрадиційні, принципово нові, підходи та математичні апарати, є надзвичайно актуальною проблемою.

1.4. Постановка задачі досліджень

Проаналізувавши фактичний технічний стан металоконструкцій об'єктів нафтогазовидобувної промисловості та умови їх експлуатації можна зробити висновок, про необхідність контролю моменту зародження несучільностей структури матеріалу конструкцій, що знаходяться у напружено-деформованому стані. Саме несучільності, під дією навантаження, мають тенденцію до подальшого розвитку і перебудови у мікро- та макроdefekти, що створюють загрозу для цілісності структури матеріалу та металічної конструкції вцілому.

Опис процесу зародження, накопичення та поширення несучільностей потребує застосування нетрадиційних підходів визначення характерних ознак процесів перебудови структури матеріалу, внаслідок перебування його під дією навантажень, нових математичних апаратів таких як теорія фракталів, фрактальна геометрія та фрактальна або дробова розмірність. На основі термодинамічної моделі слід встановити взаємозв'язок між параметрами, що описують структурні перетворення, і розробити систему опосередкованого контролю процесу зародження та розвитку мікротріщини за зміною поверхневої енергії матеріалу.

Задачами дослідження даної дисертаційної роботи є:

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

- 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;

- 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;

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

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

- розробити програмне забезпечення системи контролю для оцінки розвитку мікротріщин.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ МЕТАЛУ ЯК ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ

2.1. Аналіз деформованого тіла з позиції синергетики

Однією із основних задач вивчення механізмів деформування і руйнування твердих тіл є оцінка характеру перебігу цих процесів. Пружна, крихка або пластична поведінка матеріалів під дією зовнішніх навантажень визначається конкретними умовами навантаження твердого тіла і його фізико-хімічною природою.

До теперішнього часу основні зусилля дослідників були спрямовані на встановлення зв'язку між початковою мікроструктурою і механічними властивостями матеріалу. Однак, опір руйнуванню металів і сплавів визначається динамічною структурою, яка формується в процесі деформації і потребує аналізу деформованого матеріалу як відкритої системи, яка обмінюється енергією з оточуючим середовищем. Під час еволюції системи стара структура руйнується і виникає нова, що визначає опір матеріалу на новому етапі еволюції. В нашому випадку необхідна оцінка взаємозв'язку статичної (початкової) і динамічної (що формується під дією навантаження), тобто дисипативної структур, де утворюються мікродефекти.

Умовно розрізняють дві основні причини дефектоутворення в металах: це процес кристалізації та процес пластичної деформації.

На початковому етапі процесу кристалізації утворюються критичні зародки нової фази, що мають пористу структуру. Злиття граничних пор при з'єднанні структурних елементів кристалічної фази в процесі кристалізації призводить до утворення несучільностей та зародження субмікротріщин, та мікротріщин ще на стадії виготовлення металів. Природа процесу утворення металів та сплавів на їх основі під час процесу кристалізації така, що в структурі з самого початку закладаються елементи, які є "зародками руйнувань" твердого тіла, тобто

області, що мають дефекти кристалічної структури. Характер і ступінь порушення правильності кристалічної будови визначають, в значній мірі, властивості металів.

Значний інтерес викликають дефекти, що утворюються під час протікання процесів пластичної деформації, оскільки традиційна теорія механіки руйнувань не дозволяє до кінця оцінити деякі аспекти, що докорінно змінюють уявлення про протікання енергетичних перетворень та термодинамічних процесів під час зародження та поширення мікрodefektів у металах, з яких виготовлено деталі конструкцій, що перебувають під дією навантажень.

В ряді робіт присвячених комплексу питань руйнування металів і сплавів та конструкцій з них [7, 42, 43], розглянуто окремі аспекти з позиції представлення процесу пластичної деформації, що має багаторівневий характер, і проявляється на різних взаємопов'язаних рівнях.

В [44] виділено наступні основні масштабні рівні: мікроскопічний, з розмірами однорідно-орієнтованої області типу комірки або фрагмента; мезоскопічний, з розмірами слабоорієнтованої області та лінійним розміром субструктур; структурний, що відповідає розміру зерна; макроскопічний, співрозмірний з розмірами самого об'єкту (конструкції).

У табл. 2.1 приведено класифікацію структурних рівнів деформації у відповідності з їх характерними масштабами.

Таблиця 2.1

Структурні рівні пластичної деформації, їх класифікація і масштаб

| Структурний рівень, його назва | Характерний розмір елементів структурного рівня |
|---|---|
| Мікрорівень Атом, вакансія Перегин, поріг Дислокація Група дислокацій, зона зсуву, дислокаційна стінка, границя зерна | 0,1-0,3 нм 0,5-5 нм 10 нм 10-100 нм |

Продовження табл. 2.1

| | |
|--|--|
| Мезорівень (проміжний) Комірка, блок мозаїки, фрагмент, субзерно Дислокаційний ансамбль, частина зерна або монокристалу | 0,1-1,0 мкм 1-20 мкм |
| Структурний (рівень зерна) Зерно, дендрит, зона зсуву, зернові структури | 10-200 мкм |
| Макрорівень Група зерен Частина зразка Зразок в цілому | 0,2-0,5 мм 1 мм 1 –100 мм і більше |

Основним питанням залишається встановлення взаємозв'язку між параметрами, що визначають границі реалізації цих рівнів. Або, іншими словами, встановлення взаємозв'язку між критичними параметрами пластичної деформації на мікро – і макрорівнях.

Для розв'язання цього питання розглянемо тіло, що деформується, як синергетичну систему, з урахуванням особливих властивостей таких систем. Синергетичні системи різноманітної фізичної природи мають загальну унікальну властивість – здійснювати нерівноважні фазові переходи при зміні вхідних параметрів [45, 46]. Як правило, ці фазові переходи супроводжуються каскадом біфуркацій. Під біфуркаціями будемо розуміти спонтанний перехід системи у новий стійкий стан при досягненні певних критичних умов.

Для кількісного опису дисипативних структур базовою є теорія фракталів. Об'єднання синергетичних підходів з теорією фракталів дозволить вирішити задачу встановлення взаємозв'язку між мікро- і макрохарактеристиками міцності металів.

2.2. Структурні перебудови та утворення перехідного шару в металі під дією зовнішніх навантажень з точки зору фрактальної теорії

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, відрізкам, площинам, багатокутникам, багатогранникам, 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 досліджуваної системи. До опису внутрішніх структурних процесів досліджуваних систем, як самоподібних об'єктів, доцільним є застосування фрактальних підходів, які дозволяють компактно описувати об'єкти і процеси у визначених кількісних термінах [47].

Фрактали [48] – самоподібні об'єкти, структура локальних частин яких подібна цілому (або більшій частині) об'єкта. Під самоподібним об'єктом розуміють об'єкт, частина якого на будь-якому, навіть мінімально короткому, інтервалі розгляду в точності відтворює властивості об'єкта в цілому.

Основними кількісними характеристиками самоподібних об'єктів та процесів є фрактальна (неціла) розмірність та масштабна інваріантність (самоподібність) [49]. Для пояснення фрактальної розмірності розглянемо звичайну Евклідову розмірність d простору, в якому знаходиться фрактальний об'єкт ($d=1$ – лінія, $d=2$ – площина, $d=3$ – звичайний тривимірний простір). Покриємо цей об'єкт d -мірними фігурами, наприклад, сферами радіусу l . Припустимо, що нам необхідно для цього не менше, ніж $N(l)$ сфер. Якщо при достатньо малих l величина $N(l)$ змінюється з l за степеневим законом

$$N(l) \sim \frac{1}{l^D}, \quad (2.1)$$

то D – називається хаусдорфовою або фрактальною розмірністю цього об'єкта.

Дана формула еквівалентна співвідношенню $N \approx \left(\frac{R}{l}\right)^D$.

Формулу (2.1) можна переписати також у вигляді:

$$D = -\lim_{l \rightarrow 0} \frac{\ln N(l)}{\ln l}. \quad (2.2)$$

Це служить загальним визначенням фрактальної розмірності D . У відповідності з ним величина D є локальною характеристикою фрактального об'єкта [50].

Для адекватного опису металічної конструкції у напружено-деформованому стані, як дисипативної фрактальної системи, необхідно розглянути регулярні геометричні фрактали та параметри, що їх характеризують. Найбільш повно це можна пояснити на прикладі, так званого, килима Серпінського.

Порядок його побудови полягає в наступному. Спочатку береться квадрат з умовно прийнятою довжиною сторони рівній одиниці. Кожна з сторін квадрата поділяється на три рівні частини, а весь квадрат, відповідно, на дев'ять однакових квадратів зі стороною, що дорівнює $1/3$. З отриманої фігури вилучається центральний квадрат. В результаті проведених ітерацій одержуємо приклад ідеально самоподібного фрактала - килима Серпінського (рис.2.1).

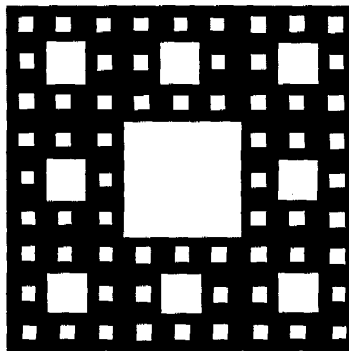


Рис. 2.1. Квадратний килим Серпінського.

Значення фрактальної розмірності даного килима обчислюється за формулою:

$$D = \frac{\ln 8}{\ln 3} = 1,8928 \quad (2.3)$$

Побудова просторового аналога квадратного килима Серпінського, що носить назву губки Менгера, описана у [47]. Кожна грань куба губки Менгера має вигляд квадратного килима Серпінського (рис.2.2).

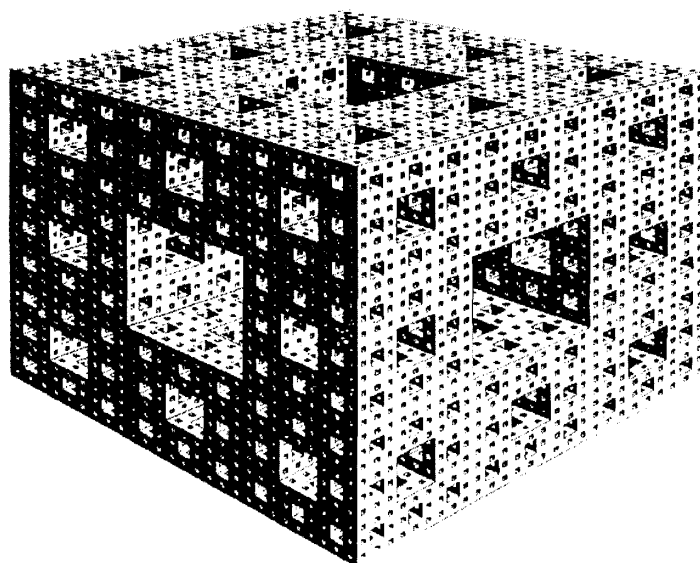


Рис. 2.2. Губка Менгера.

Фрактальна розмірність губки Менгера визначається за формулою:

$$D = \frac{\ln 20}{\ln 3} = 2,7268. \quad (2.4)$$

Оскільки $2 < D < 3$, то губка має нульовий об'єм, але володіє нескінченною площею поверхні своїх пор. Якщо множина, що складається з однакових елементів, будується шляхом самоподібного процесу, причому на будь-якому кроці кожен із елементів з лінійними розмірами l замінюється p подібними елементами, розміром l/q (де $q > 1$) кожен, то фрактальну розмірність такого об'єкта можна визначити за формулою:

$$D = \frac{\ln p}{\ln q} = 2,7268. \quad (2.5)$$

Відзначимо, що для розглянутих вище фракталів фрактальна розмірність D є меншою, ніж розмірність того простору d , в якому знаходиться даний фрактальний об'єкт. Нерівність $D < d$ відображає факт некомпактності фрактала, причому, чим більше відрізняються величини d і D , тим фрактал є більш рихлим.

Одними з найбільш цікавих об'єктів для дослідження фрактальних структур є метали і сплави, враховуючи їх кристалічну будову, особливо за умов перебування у напружено-деформованому стані.

Під час розгляду процесу руйнування, як нерівноважного фазового переходу, необхідно визначити фрактальну розмірність дисипативної структури, яка характеризує руйнування. Дисипативні структури поблизу точок біфуркації представляють динамічну множину, що володіє властивостями універсальності, масштабної інваріантності та властивістю до самоподібного поширення.

Постає завдання встановити універсальний взаємозв'язок між параметрами дисипативної структури та механічними властивостями металу за допомогою концепції фракталів.

Розгляд процесу самоподібного розвитку фрактальної структури на прикладі губки Менгера дозволяє застосувати аналогічні підходи до пояснення процесу структурних перетворень у металах на мікро- та макрорівнях в залежності від параметрів пластичної деформації.

Носіями надлишкової енергії в реальних металах при дії на них зовнішнього навантаження є дислокації, які виконують визначені функції. Саме вони сприяють мінімізації енергії дисипативної системи, і перерозподіляють її в об'ємі металу [51]. Але, ефективність окремих дислокацій, зі збільшенням їх густини при досягненні критичного стану, зменшується, при цьому в металі починають формуватися нові, зрівноважені відносно локальних збуджень, дислокаційні структури, що забезпечують більш ефективний перерозподіл внесеної енергії. Відомо [52], що метали досягають енергетично найбільш вигідного стану тільки в тому випадку, коли в них присутня визначена рівноважна густина дислокацій ρ . Під густиною дислокацій будемо розуміти сумарну довжину всіх ліній дислокацій в одиниці об'єму металу. При виготовленні металу початкова густина дислокацій складає, переважно, менше 10^8 см^{-2} [53].

Розглянемо дію навантаження на метал, яка призводить до деформації і виникнення всередині металу поля напружень. Поле напружень діє на структуру металу таким чином, що в них починає здійснюватись декілька механізмів дисипації, які прагнуть зменшити дію цього поля, а саме: перехід частини потенціальної енергії поля напружень в структурну складову енергії за рахунок виникнення точкових дефектів і нових дислокацій; зниження енергії за рахунок

перебудови дефектних структур. Наприклад, за рахунок об'єднання дислокацій в структури більшого масштабу; безпосередня дисипація частини прикладеної енергії в тепло під час руху дефектів всередині металу.

Дія навантаження на метал призводить до безпосереднього збільшення в ньому густини дислокацій ρ . Наступає такий момент, коли густина досягає критичної величини $\rho_{кр}$, при якому пружна деформація металу є вже неможливою. В ньому залишаються внутрішні напруження, що зумовлені високим числом дислокацій. Метал з пружного стану може переходити в пластичний. Деформація при цьому є незворотною [44].

Концентрація дислокацій є параметром, що визначає поведінку металів під дією навантаження. Пластична деформація починається в той момент, коли дислокацій стає настільки багато, що відстань між ними зменшується до критичного значення, нижче якого вони починають взаємодіяти між собою (так званий колективний ефект).

У сукупності дислокаційних структур спостерігається складна скоординована взаємодія, яка не притаманна одинарним дислокаціям. Ця взаємодія між дислокаціями призводить до значного підсилення дисипації енергії.

Існує два основних механізми колективної взаємодії дислокаційних структур: трансляційний – дислокаційні структури переміщуються паралельно самі собі; ротаційний – дислокаційні структури, як єдине ціле, обертаються відносно деякої точки [46].

Ці механізми призводять до утворення декількох послідовних різних рівнів дислокаційних структур (рис. 2.3) [54].

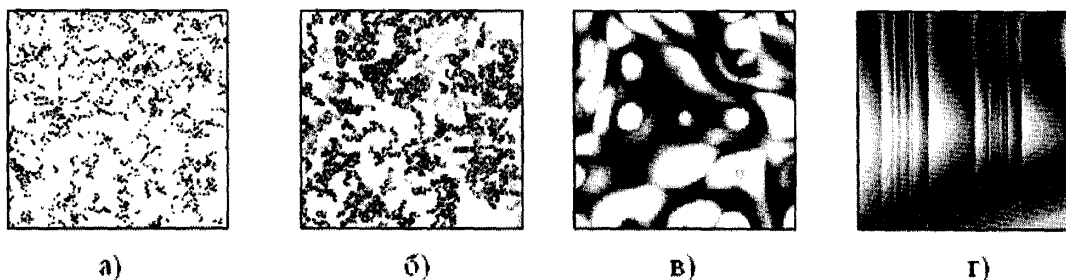


Рис. 2.3. Схематичне зображення структур, які виникають в металічних матеріалах при пластичній деформації:

- а) хаотичний розподіл;
- б) накопичення і клубки;
- в) коміркова структура;
- г) смугаста структура.

Метал, що не піддавався навантаженням, має в собі початкову густину дислокацій, яка збільшується під дією навантаження. На межі переходу металу з пружного в пластичний стан досягається критичне значення густини дислокацій, але самі дислокації у металі розташовуються хаотично. Під дією навантаження спрацьовує один із механізмів дисипації внесеної енергії, а саме - перетворення її в енергію утворення дислокацій. За рахунок цього, кожна новоутворена одиночна дислокація володіє визначеною кількістю енергії [55].

При подальшому збільшенні деформації, за рахунок трансляційного переміщення дислокацій утворюються структури у вигляді накопичень і клубків (рис.2.3 б). На цьому етапі вже діє інший механізм дисипації, який дозволяє позбавлятися від частини енергії, накопиченої одиночними дислокаціями, за рахунок їх переміщення і об'єднання.

При досягненні чергової критичної густини дислокацій $\rho_{кр}$, лиття металу виявляється достатнім для того, щоб в ньому могло проходити обертання дислокаційних структур. Щоб зберегти просторову суцільність метал вимушений створювати періодичну структуру. Це призводить до перебудови структури металу і формування коміркових або сіткових структур (рис. 2.3 в). Границі коміркової структури починають притягувати дислокації. Товщина цих границь з часом

поступово збільшується. Густина дислокацій на границях збільшується, тоді як у тілі самих комірок вона стає практично початковою ρ_0 [56].

Досягнення значень чергової критичної густини дислокацій призводить до того, що границі комірчастої структури стають нестійкими, і подальший притік дислокацій в ці границі неможливий. Тоді проходить ще одна перебудова структури металу, і виникає смугаста структура (рис. 2.3 г). Аморфна структура, яка виникає за рахунок накопичення ще більшої концентрації дислокацій, - це насичена дислокаціями до визначеного критичного значення рихла зона. Матеріал цієї зони не густо заповнює свій об'єм.

Процес зародження мікротріщин є процесом виникнення двох нових двовимірних поверхонь на місці тривимірного об'єму. Це є можливим після формування зони переходу (перехідного шару) між існуючим трьохвимірним об'ємом структури і двовимірною площиною [57].

Утворення даного шару пояснює природу виникнення поверхневої енергії тіла в напружено-деформованому стані. Припустимо, що існує деяка перехідна зона товщиною d , в якій здійснюється структурування металу при переході з тривимірної структури у двовимірну. При цьому, зі зменшенням значення розмірності структур речовини, що заповнює перехідний шар, буде вивільнятися певна кількість енергії. Інтегральне значення енергії, що зберігається у товщині d перехідного шару є поверхневою енергією, яка свідчить про структурні перетворення, які відбуваються у металі в результаті пластичної деформації. Перехідний шар є об'єктом, що володіє сукупністю фрактальних розмірностей в розподілі геометричних, енергетичних, хімічних та інших властивостей. При цьому числові значення фрактальної розмірності структур перехідного шару характеризують ступінь заповнення речовиною тривимірного простору. Фрактальна розмірність структур перехідного шару зменшується від значення $D \gg 3$ біля об'ємної частини структурного елемента до $D=2$ на його поверхні.

Властивістю активно поглинати і тим самим накопичувати енергію володіють саме фрактальні структури.

Необхідно зазначити, що структурування речовини в перехідному шарі при $D \in (2;3)$ є необхідною умовою стабільного існування даної системи: при $d = 3$ не існує можливості варіації і трансформації структури твердого тіла, так як ця структура перебуває у стані рівноваги. В поверхневому перехідному шарі з розмірностями $D \in (2;3)$, і тільки у ньому, закладається набір можливих станів, які система може проходити, реагуючи на зовнішні умови (шляхом формування дефектів, здійснення фазових переходів та ін.).

При зменшенні розмірності D розподіл речовини в просторі (при переході від об'ємної частини фази з $d=3$ до поверхні розділу з $d=2$) значення енергетичної складової системи збільшується за рахунок збільшення значення різниці розмірностей $3-D$, що експериментально можна визначити за зміною поверхневої енергії зразка. Вона частково релаксує шляхом змішування частинок сусідніх макрофаз у верхній частині перехідного шару, утворюючи так званий мультифрактальний набір структур [58].

Внутрішня структура самого перехідного шару є досить складною і включає в себе умовно декілька зон (рис.2.4).

При переході безпосередньо від однорідного розподілу властивостей в об'ємній частині спостерігається масовий вихід дислокацій, і формується перша підповерхнева зона I. В цій зоні здійснюється самоорганізація дислокаційних накопичень в замкнуті коміркові, спіральні або інші структури. Стискаючі напруження в ній забезпечують збереження форми і властивостей граничної з нею об'ємної фази, яка простягається всередину об'єкта.

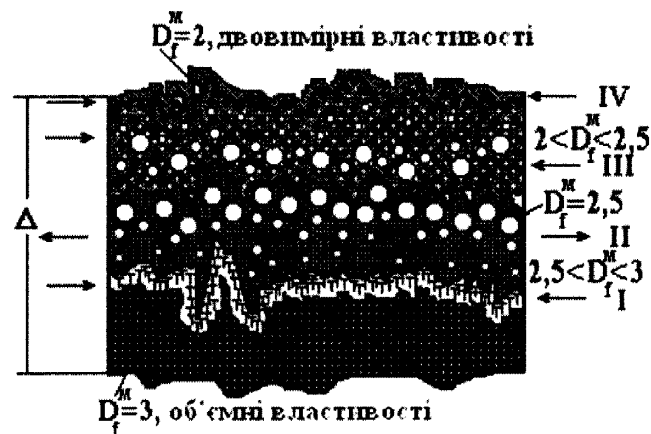


Рис.2.4. Схема побудови перехідного шару на межі метал-газ.

На рис. 2.4 стрілками позначено зони, які підлягають стисканню (стрілки направлені назустріч одна одній) і розтягу (стрілки направлені в протилежні сторони) напруженням. D_f^M - це фрактальна розмірність речовини, яка утворює структури перехідного шару.

Конкретна конфігурація структури дислокацій залежить від умов виготовлення деталі (конструкції), від зовнішніх умов експлуатації металу. В цій зоні перехідного шару закладаються, також, характеристики неоднорідності геометричних і енергетичних властивостей, які потім проявляються у вищезгаданих приповерхневих зонах перехідного шару. Зона накопичення дислокацій характеризується фрактальним розподілом в ній даних лінійних дефектів. В залежності від конкретної геометричної форми дислокаційної структури і приналежності до будь-якої із стадій еволюції дислокаційної підсистеми (хаос, клубки, комірки, фрагменти) дана зона характеризується визначеним енергетичним змістом і відрізняється значеннями фрактальної розмірності дислокаційних структур. Серед різних дислокаційних ансамблів комірчасті конфігурації найбільш відповідають дисипативному стану структури металу. Вони характеризують значення фрактальної розмірності дислокаційної структури $D_p \gg 1,5$.

Дислокаційна структура першої зони розглядається як результат дисипації накопиченої пружної енергії, яка виливається в самоорганізацію незрівноважених структур, забезпечуючи тим самим подальшу стійкість системи. Фрактальна розмірність речовини в цій зоні $D_f^{\text{матер}}=3$, проте віддалений порядок розташування частинок порушується за рахунок великої кількості дислокацій.

Наступна зона II має рихлу, пористу структуру пов'язану з обривом великої кількості дислокацій в нижчій зоні. Вона може бути описана як губка Менгера. В ній реалізуються розтягуючі напруження. Фрактальна розмірність заповнення речовиною матеріалу трьохвимірного простору в даній зоні приймає значення в межах $3 > D_f^{\text{матер}} > 2,5$. Зниження фрактальної розмірності і густини речовини відбувається за рахунок збільшення кількості вакансій і пор в даній зоні перехідного шару. Фрактальна розмірність структури дефектів збільшується з товщиною зони в

напрямку від об'ємної частини і збільшує енергетичний зміст даної області перехідного шару.

При послабленні міжатомних зв'язків в кристалі спостерігається надлишок в енергії кристалічної ґратки. Оскільки у пористій частині перехідного шару розтягуючі напруження зумовлюють збільшення періоду ґратки (відстань між атомами), то енергія даної зони має більше значення в порівнянні з енергією об'ємної кристалічної ґратки, що робить внесок в інтегральну величину поверхневої енергії.

Відомо, що дислокації є “ємністю” (стоком) для вакансій в I частині перехідного шару. Звідси, сполучення їх структур зі структурою розрихленої зони, що включає вакансії, є системою дефектів в перехідному шарі металу, що автогенерується і автозберігається [59].

Дана система, таким чином, володіє великим запасом енергії, розподіленої по цій фрактальній системі у вигляді набору значень ймовірностей, зумовлюючи тим самим мультифрактальні властивості перехідних шарів і забезпечуючи перехід від тривимірного розподілу енергії і її властивостей в простір з двома вимірами.

Особливість структури перехідного шару полягає в наявності зони накопичення дислокацій разом з вищерозташованою пористою зоною, насиченою вакансіями. Структура речовини перехідного шару, а також накопичення даних дефектів має фрактальний характер.

Зона III, що граничить в своїй нижній частині з насиченою вакансіями зоною II – структурою типу губки Менгера – характеризується наявністю в ній частин обох об'ємних фаз (адгезійно-закріплюючий шар).

Необхідно зазначити, що при переході в наступну вищу зону перехідного шару – в область нестехіометрії - взаємодія дефектів кристалічної ґратки зі структурою, що складає дану ґратку набору частинок, відіграє роль передвісника нової фази [9].

З втратою хімічної стабільності дана зона набуває властивості механічної стабільності, яка полягає в пластичності, можливості легкої перебудови взаємного розташування атомів внаслідок зміни їх координаційного числа. За рахунок впливу

механічних навантажень в пористій структурі проходять внутрішні трансформації в найбільш енергетично вигідну для сприйняття даного навантаження локальну структуру. Якщо частинки контактуючих фаз можуть створювати стехометричні з'єднання, то на границі перехідного шару створюється мономолекулярний шар зони IV. Він також включає в себе частини обох об'ємних фаз, але характеризується стехометричністю, яка, однак, має місце тільки у площині шару. Це зумовлює і пояснює наявність сингулярності (стрибка) температури на поверхні твердого тіла під час зародження мікроефектів. Тому ми говоримо про розмірність розподілу фізико-хімічних властивостей в даному шарі $D=2$.

Так як в процесі створення і експлуатації металів дефекти кристалічної структури виникають, як результат дисипації енергії, то границі являють собою не фіксовану, а змінну фазу, в якій проходять процеси постійного накопичення дефектів і перебудови дефектної структури металу.

Саме кінетика фазових переходів із одного стану в інший і визначає властивості границь фаз і металу в цілому.

Завершальним етапом у процесах накопичення дефектів на границях є формування структури перехідного шару. Енергія перехідного шару має максимальне значення із всіх значень енергії граничних зон структурних елементів металу.

Утворення накопичень дислокацій як зони I перехідного шару відбувається, в більшості, біля несущільностей на пористих границях, які закладаються в металі ще в процесі кристалізації. Це супроводжується локальною концентрацією напружень, що, в свою чергу, викликає виникнення зародків мікротріщин. Закінчення процесу формування перехідного шару характеризується утворенням нової поверхні (мікротріщини), а локальні напруження в зоні формування перехідного шару дисипують в поверхневу енергію мікротріщини. У вершині утвореної мікротріщини формується аморфна зона металу, що відповідає зоні II перехідного шару. В цій пластичній області, внаслідок активізації процесів дифузії дислокацій, відбувається локальне підвищення температури, яке піддається реєструванню [42, 60]. Це ще більше активізує процес подальшої аморфізації металу навколо вершини

мікротріщини, генеруючи структури передлиття. Останнє викликає взаємоузгоджене, автокаталітичне розмноження дефектів.

Отже, опір руйнуванню металів та їх сплавів визначається дисипативними процесами, при яких в матеріалі відбувається формування зон перехідних шарів – зони накопичення дислокацій і аморфної зони з фрактально-пористою структурою.

2.3. Аналіз енергетичних змін у структурі металу під час зародження мікроефектів

Класифікація мікроскопічних механізмів, що характеризують таке складне явище, як пластична деформація, дозволяє виділити дві найбільш характерні групи механізмів утворення дислокаційних структур: адаптивного і дисипативного типів, що пов'язані відповідно з постійним накопиченням дефектів і спотворень структури та тепловими ефектами процесів.

З термодинамічних теорій руйнувань, що ґрунтуються на густині енергії деформації, яка визначається на основі термодинамічних констант, найбільший розвиток знайшла ергодинамічна теорія [9, 10, 61].

З ергодинамічної точки зору процес пластичної деформації, пошкодженості і руйнування твердого тіла розглядається як боротьба двох протилежних взаємопов'язаних і одночасно існуючих в деформованому тілі груп мікроскопічних процесів.

Вони пов'язані відповідно зі збільшенням густини прихованої енергії ΔU_e різного роду дефектів і пошкоджень, що зароджуються і накопичуються в системі за рахунок роботи зовнішніх сил W_p , і з вивільненням її за рахунок різного роду дисипативних процесів, які проходять всередині тіла, що деформується.

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:

$$W_p = \Delta U_e + q \quad (2.6)$$

де ΔU_e – зміна густини прихованої енергії деформації, яка відповідає за деформаційне зміцнення;

q – теплова енергія пластичної деформації.

Частина енергії, що пов'язана саме з тепловим ефектом пластичної деформації q , не затримується в деформованому металі і розсіюється у зовнішньому середовищі за рахунок теплообміну. Інша частина енергії теплового ефекту накопичується в твердому тілі, що зазнає деформації, у вигляді теплової складової [7] внутрішньої енергії ΔU_T , і підвищує його температуру.

Накопичена в деформованому тілі внутрішня енергія визначається сумою двох складових [42]:

$$\Delta U = \Delta U_e + \Delta U_T, \quad (2.7)$$

де ΔU_T – теплова складова густини внутрішньої енергії.

Згідно з [7] за параметр пошкоженості і критерій руйнування приймається густина внутрішньої енергії U , накопиченої в деформованому тілі. У відповідності з ергодинамічною теорією тіло вважається зруйнованим, якщо хоча б в одному макрооб'ємі, що відповідає за руйнування, густина внутрішньої енергії досягає граничного (критичного) значення U_* . Даному моменту відповідає поява в системі біфуркацій, утворення мікротріщин критичного розміру та різка локалізація процесу у вістрі мікротріщини.

Умову локального руйнування можна представити у вигляді [61]:

$$U(\vec{r}_*, t_*) = U(\vec{r}_*, 0) + \int_0^{t_*} \frac{\partial U}{\partial t}(\vec{r}_*, t) dt = U_* = const \quad (2.8)$$

де $U(\vec{r}_*, t)$ - швидкість зміни густини внутрішньої енергії в локальному макрооб'ємі матеріалу, що відповідає за руйнування;

$U(\vec{r}_*, 0)$ - густина внутрішньої енергії у початковому стані (до деформування, $t=0$);

\vec{r}_* - радіус - вектор, який визначається координатами (x_*, y_*, z_*) локального об'єму тіла.

У відповідності до принципу суперпозиції енергії Планка [62] і локалізації руху енергії [63]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial U_0}{\partial t} = \frac{\partial U_T}{\partial t}, \quad (2.9)$$

де $U \equiv U(\vec{r}, t)$;

$U_0 \equiv U_0(\vec{r}, t)$;

$U_T \equiv U_T(\vec{r}, t)$.

У виразі (2.9):

$$\frac{\partial U_0}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{I}_0 + \frac{\partial U_e}{\partial t}, \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial U_T}{\partial t} = -\operatorname{div} \vec{I}_T + \frac{\partial q}{\partial t}, \quad (2.11)$$

де \vec{I}_0, \vec{I}_T - потоки потенціальної (прихованої) і теплової складових внутрішньої енергії ($\vec{I}_0 \equiv \vec{I}_0(\vec{r}, t); \vec{I}_T \equiv \vec{I}_T(\vec{r}, t); q \equiv q(\vec{r}, t)$), що визначаються за співвідношеннями, які в лінійному наближенні рівні [64]:

$$\vec{I}_0 = -F_0 \operatorname{grad} U_0 - F_{T0} \operatorname{grad} U_T; \quad (2.12)$$

$$\vec{I}_T = -F_T \operatorname{grad} U_T - F_{0T} \operatorname{grad} U_0, \quad (2.13)$$

де F – питома енергія сублимації.

Якщо використати співвідношення взаємності Онзагера [42]:

$$F_{T0} = F_{0T}, \quad (2.14)$$

то значення потужності внутрішніх джерел прихованої енергії і теплової енергії пластичної деформації U_e і q можна визначити за допомогою кінетичних рівнянь стану у вигляді:

$$\frac{\partial U_e}{\partial t} = A * sh \left(\frac{\alpha \sigma_i^2 - \nu U_e}{2kT} \right), \quad (2.15)$$

та

$$\frac{\partial q}{\partial t} = B * sh \left(\frac{\alpha \sigma_i^2 + \nu U_e}{2kT} \right), \quad (2.16)$$

Рівняння (2.15), (2.16) описують кінетику зміни у деформованих об'єктах густини прихованої енергії U_e пошкодженості і теплового ефекту q пластичної деформації.

У даних рівняннях A і B є кінетичними коефіцієнтами, що можна описати за допомогою рівнянь [7]:

$$A = \frac{2kT}{hV_0} \sum_i U_i'(\sigma_0, T) \exp\left[-\frac{U_i'(\sigma_0, T)}{kT}\right], \quad (2.17)$$

$$B = \frac{2kT}{hV_0} \sum_i U_i''(\sigma_0, T) \exp\left[-\frac{U_i''(\sigma_0, T)}{kT}\right], \quad (2.18)$$

Де

$$U_i'(\sigma_0, T) = U_{0i}' + \Delta U'(T) \pm \beta \sigma_0^2, \quad (2.19)$$

$$U_i''(\sigma_0, T) = U_{0i}'' + \Delta U''(T) \pm \beta \sigma_0^2, \quad (2.20)$$

$$\alpha = \frac{k_\sigma^2 V_0}{6G}, \quad (2.21)$$

$$\beta = \frac{k_\sigma^2 V_0}{2K}, \quad (2.22)$$

де U_{0i}', U_{0i}'' - енергія активації утворення і дифузії елементарних дефектів i -го типу;

σ_0, σ_i - гідростатичне напруження і інтенсивність напруження;

α - параметр, що залежить від структури;

T - абсолютна температура;

k - стала Больцмана;

V_0 - атомний об'єм;

h - стала Планка;

G - модуль зсуву;

K - модуль об'ємної пружності;

k_σ - коефіцієнт нерівномірності розподілу напружень по об'єму;

ν - коефіцієнт нерівномірності розподілу прихованої енергії по об'єму;

β - параметр, що визначає ієрархію розвитку тріщини.

Згідно з проведеним ергодинамічним аналізом [10] сумарна величина накопиченої пластичної деформації (ϵ_i^p) і швидкість її зміни $\left(\frac{\partial \epsilon_i^p}{\partial t}\right)$ є сума двох складових, пов'язаних відповідно з деформаційним зміцненням $\left(\epsilon_e^p, \frac{\partial \epsilon_e^p}{\partial t}\right)$ і динамічним поверненням $\left(\epsilon_q^p, \frac{\partial \epsilon_q^p}{\partial t}\right)$. Під деформаційним зміцненням будемо розуміти

процес, в результаті якого напруження, що необхідне для початку пластичної деформації, збільшується внаслідок попереднього пластичного деформування. Динамічне повернення – це процес, в результаті якого напруження, що необхідне для пластичного лиття, зменшується [65]:

$$\frac{\partial \epsilon_i^P}{\partial t} = \frac{\partial W_p / \partial t}{\sigma_i} = \frac{\partial \epsilon_e^P}{\partial t} + \frac{\partial \epsilon_q^P}{\partial t} = \frac{1}{\sigma_i} \frac{\partial (U_e + q)}{\partial t}. \quad (2.23)$$

З врахуванням рівнянь термодинамічної і термофлуктуаційної теорій, кінетичне рівняння пластичної деформації (2.23) можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \epsilon_i^P}{\partial t} = \sum_i g_{0i}(\sigma_0, \sigma_i, T, U_e) \exp\left[-\frac{U_i''(\sigma_0, T)}{kT}\right]. \quad (2.24)$$

У даному рівнянні

$$g_{0i}(\sigma_0, \sigma_i, T, U_e) = \frac{2kTU_i'(\sigma_0, t)}{hV_0\sigma_i} \left[\varphi_i \operatorname{sh}\left(\frac{\alpha\sigma_i^2 - \nu U_e}{2kT}\right) + \operatorname{sh}\left(\frac{\alpha\sigma_i^2 + \nu U_e}{2kT}\right) \right], \quad (2.25)$$

$$\varphi_i = \exp\left(\frac{U_{mi}(T)}{kT}\right), \quad (2.26)$$

$$U_{mi} = U_i'' - U_i'.$$

Аналіз кінетичного рівняння (2.24) дає можливість побачити дуальну природу пластичної деформації, що розвивається в часі.

Перша частина цього рівняння (2.25) визначає складову швидкості пластичної деформації, що контролюється мікроскопічними процесами адаптивного типу, які пов'язані з деформаційним зміцненням металу. Інша частина (2.26) контролюється дисипативними процесами, що зумовлюють тепловий ефект пластичної деформації.

Проведений у [7] аналіз кінетичних рівнянь (2.15) і (2.16) показує, що при визначених умовах, які характеризують постійність зовнішніх діючих сил ($\sigma_0 = \text{const}$, $\sigma_i = \text{const}$, $T = \text{const}$), реальні металічні системи асимптотично прагнуть до усталеного стану, при цьому

$$\frac{\partial U_e}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial q}{\partial t} = \left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)_{\max}. \quad (2.27)$$

З кінетичного рівняння (2.15) за умов (2.27) згідно з [66] можна зробити

ВИСНОВОК:

$$\sigma_i = \sigma_s = \left(\frac{v \cdot U_e}{\alpha} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.28)$$

згідно з яким металічна система $\sigma_s(v, U_e, k_\sigma)$ на встановленій стадії процесу деформації адаптується до умов зовнішньої дії.

При цьому в системі спостерігається динамічна рівновага між мікроскопічними процесами, які контролюють стан системи, а робота зовнішніх сил (W_p) повністю перетворюється в теплову (q) і розсіюється в оточуючому середовищі. Принцип максимальної дисипації енергії відображається за допомогою формули:

$$\left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_{\max} = \frac{\partial W_p}{\partial t} = B \cdot sh \left(\frac{\alpha \sigma_i^2}{kT} \right). \quad (2.29)$$

В цих умовах процес квазів'язкого лиття характеризується самоорганізацією структури матеріальної системи.

У відповідності з (2.28)

$$\left(v \cdot U_e / \alpha \right)_i = const, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.30)$$

При цьому процес самоорганізації структури пов'язаний з більш рівномірним розподілом прихованої енергії по об'єму, зменшенням перенапружень на міжатомних зв'язках, що призводить до підвищення працездатності системи.

В загальному випадку напруження (σ_0, σ_i) і температура T є функціями координат \bar{r} і часу t :

$$\sigma_0 = \sigma_0(\bar{r}, t); \sigma_i = \sigma_i(\bar{r}, t); T = T_0(\bar{r}, t). \quad (2.31)$$

Для вирішення питання критичного значення густини внутрішньої енергії, що накопичується у деформованому тілі до моменту його руйнування (втрати стійкості кристалічної ґратки), обрано теорію енергетичної аналогії процесів плавлення і механічного руйнування, як таку, що більш повно описує ці процеси [8]. При цьому слід звернути увагу на те, що прихована теплота плавлення L_s є енергією, необхідною для порушення зв'язків у гранично спотвореній (в процесі нагріву до температури плавлення) кристалічній ґратці. Тому при співставленні енергії руйнування під дією механічних сил з прихованою енергією плавлення необхідно приймати до увагу не всю енергію руйнування, затрачену з початку прикладення

навантаження і до повного руйнування, а тільки ту її частину, що затрачається на руйнування кристалічної ґратки в локальних об'ємах металу зі спотвореними до критичної величини зв'язками. А також на те, що під дією механічного навантаження пластична деформація протікає не однорідно 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 вищого порядку.

Тому питому енергію U_* , накопичену в об'ємі металу, що відповідає за руйнування, необхідно розглядати, як таку, що складається з двох частин. Перша частина - питома енергія U'_* , що витрачається на створення граничних статичних спотворень, пов'язаних з дислокаціями та іншими дефектами, зародженими і затриманими в металі в процесі пластичної деформації. Друга - питома енергія U''_* , що витрачається на руйнування міжатомних зв'язків в об'ємі з граничними статичними спотвореннями [9]. Тобто:

$$U_* = U'_* + U''_* . \quad (2.32)$$

Під час деформації металу весь його об'єм V буде рівномірно поглинати енергію спотворення і до визначеного моменту буде насичений граничною енергією спотворень, яка рівна ентальпії матеріалу в твердому стані при температурі плавлення

$$U'_* = \Delta H_{TB} = \int_0^T c_p dT . \quad (2.33)$$

де ΔH_{TB} - ентальпія матеріалу в твердому стані при температурі плавлення;
 c_p - теплоємність матеріалу при сталому тиску.

Граничний об'єм руйнування V_p у цьому випадку буде за своєю величиною менший початкового V . Для порушення міжатомних зв'язків з граничним спотворенням необхідно внести додаткову енергію, яка визначається за формулою [39]:

$$U_*^* = \left(\frac{V_p}{V} \right) \cdot L_s. \quad (2.34)$$

Таким чином, сумарна питома внутрішня енергія, що поглинається деформованим об'ємом в процесі деформації, до моменту руйнування визначається за формулою:

$$U_* = \int_0^T c_p dT + \left(\frac{V_p}{V} \right) \cdot L_s. \quad (2.35)$$

В залежності від структури металу і умов деформування та руйнування співвідношення $\frac{V_p}{V}$ може змінюватися в межах

$$0 \leq \left(\frac{V_p}{V} \right) \leq 1,0. \quad (2.36)$$

тому, критичне значення внутрішньої енергії, що поглинається деформованим об'ємом може змінюватися в межах

$$\Delta H_{TB} \leq U_* \leq \Delta H_s. \quad (2.37)$$

де ΔH_s - ентальпія матеріалу в рідкому стані при температурі плавлення.

В локальному об'ємі, що відповідає за руйнування $\frac{V_p}{V} \rightarrow 1,0$, тому $U_* \rightarrow \Delta H_s$. При пластичній деформації великих об'ємів V в умовах однорідного напруженого стану до моменту утворення тріщин критичного розміру співвідношення $\frac{V_p}{V} \rightarrow 0$, тому $U_* \rightarrow \Delta H_{TB}$. І навпаки, в умовах зносу або шліфування $V_p \rightarrow V$. Тому $\frac{V_p}{V} \rightarrow 1,0$ і $U_* \rightarrow \Delta H_s$.

Для обґрунтування достовірності термодинамічного критерію руйнування (U_*) і явища енергетичної аналогії процесів механічного руйнування і плавлення металів та сплавів було проаналізовано результати попередніх експериментальних досліджень енергетичного балансу процесу деформування і руйнування широкого

класу металічних сплавів при двох видах механічного навантаження: при об'ємному деформуванні циліндричних зразків з симетричним циклом розтяг-стиск з частотою 12,5Гц; при поверхневому руйнуванні в умовах абразивного зносу (шліфування) від тертя до нанесених абразивних частинок [10, 11].

Обробка результатів експериментальних даних показала, що дослідні значення зміни густини внутрішньої енергії ΔU_* , що була накопичена в деформованому об'ємі зразка сталі в момент руйнування, виявилися практично незалежними від амплітуди циклічних напружень σ_α .

Результати досліджень енергетичного балансу процесу втомного руйнування і абразивного зносу (шліфування) металів підтверджують достовірність термодинамічного критерію руйнування деформованих тіл [67], а також гіпотезу енергетичної аналогії процесу плавлення і механічного руйнування металів [68].

Автори [9, 69] в результаті проведених експериментальних досліджень прийшли до висновку, що значення критичної густини внутрішньої енергії U_c співпадає із значенням ентальпії плавлення, а також, що в локальних об'ємах матеріалу, які відповідають за руйнування, метал знаходиться в квазіаморфному стані, а між процесами механічного руйнування і плавлення металів і сплавів існує структурно – енергетична аналогія.

Базуючись на результатах попередніх дослідників, щодо структурно-енергетичної аналогії процесів механічного руйнування і плавлення металів необхідно створити математичну модель, яка відображає і встановлює взаємозв'язок між термодинамічними характеристиками напружено-деформованого тіла в момент зародження мікротріщин.

2.4. Термодинамічна модель процесу зародження мікротріщин у напружено-деформованому тілі

Передача тепла може відбуватися трьома способами: теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням. У нашому випадку процес передачі тепла

відбувається за допомогою теплопровідності, шляхом безпосереднього дотику частинок неоднорідної структури металу з різною температурою.

Теплопровідність представляє собою, згідно з поглядами сучасної фізики, молекулярний процес передачі тепла. Передача тепла теплопровідністю залежить від фізичних властивостей тіла, його геометричних розмірів [70].

В загальному випадку процес передачі тепла теплопровідністю в твердому тілі супроводжується зміною температури T як у просторі, так і в часі [71]:

$$T = f(x, y, z, t), \quad (2.38)$$

де x, y, z - просторові координати точки;

t - час.

Ця функція визначає температурне поле в однорідному ізотропному тілі. Під температурним полем будемо розуміти сукупність значень температури в даний момент часу для всіх точок досліджуваного простору, в якому протікає процес.

Границя відношення зміни температури (ΔT) до відстані між ізотермічними поверхнями по вектору нормалі ($\Delta \vec{n}$), яка прямує до нуля, називають градієнтом температури, який у загальному випадку розраховується за формулою [72]:

$$\text{grad}T = \lim_{|\Delta \vec{n}| \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta T}{\Delta \vec{n}} \right) \equiv \frac{\partial T}{\partial \vec{n}}, \quad (2.39)$$

Градієнт температури – це вектор, напрямлений по нормалі до ізотермічної поверхні в сторону збільшення температури і чисельно рівний частковій похідній від температури у цьому ж напрямку [73].

Для поширення тепла в будь-якому тілі необхідною умовою є наявність різниці температур в різних точках тіла. Зв'язок між кількістю тепла δQ , яка проходить за проміжок часу dt через елементарну площину dS , розташовану на ізотермічній поверхні, і градієнтом температури встановлюється за допомогою гіпотези Фур'є, згідно якої [74]:

$$\delta Q = -\chi \left(\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \cdot d\vec{S} \right) dt, \quad (2.40)$$

де \vec{n} - це вектор нормалі до елемента поверхні dS .

Від'ємний знак у правій частині вказує на те, що в напрямку теплового потоку температура зменшується і $gradT$ є величиною від'ємною. Коефіцієнт пропорційності χ називається коефіцієнтом теплопровідності або більш коротко – теплопровідністю [75]. Під тепловим потоком (dq) будемо розуміти відношення кількості тепла, що проходить через задану поверхню, до часу: $dq = -\chi \left(\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \cdot d\vec{S} \right)$.

Відношення теплового потоку (dq) через елементарну частинку ізотермічної поверхні до елемента площі ($d\vec{S}$) цієї поверхні називають поверхневою густиною теплового потоку (\vec{j}) (або вектором густини теплового потоку): $\vec{j} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial \vec{n}}$. Вектори \vec{j} і $gradT$ лежать на одній прямій і напрямлені у протилежні сторони [76].

Тепловий потік, що проходить через довільну поверхню знаходять за допомогою виразу:

$$q = \int_S \vec{j} d\vec{S} = - \int_S \chi \left(\left(\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right) \cdot d\vec{S} \right). \quad (2.41)$$

Кількість тепла, що пройшла за одиницю часу через цю поверхню визначається інтегралом:

$$Q = - \int_0^{\tau} \int_S \chi \left| \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right| dS dt. \quad (2.42)$$

Таким чином, для визначення кількості теплоти необхідно знати температурне поле всередині тіла. Знаходження температурного поля складає основну задачу аналітичної теорії теплопровідності.

Вивчення будь-якого фізичного процесу пов'язане з встановленням залежностей між величинами, які характеризуються даний процес. Зв'язок між величинами, що приймають участь в передачі тепла теплопровідністю, встановлюється диференціальним рівнянням теплопровідності [77].

Диференціальне рівняння теплопровідності з джерелом тепла всередині тіла має вигляд [78]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (2.43)$$

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;

$T \equiv T(\vec{r}, t)$ - об'ємно-часова функція розподілу температури;

$q_v \equiv q_v(\vec{r}, t)$.

Рівняння теплопровідності можна переписати у наступному вигляді:

$$\operatorname{div}[a \cdot \operatorname{grad}(T)] + \frac{q_v}{c\rho} = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.44)$$

Оскільки, напружено-деформований стан характеризується динамічними процесами утворення і анігіляції різного роду дефектів, то слід звернути увагу на постійну взаємодію останніх та кількість тепла, яка виділяється під час утворення мікротріщин.

Під час розрахунку кількості тепла необхідно враховувати як вплив енергії, що виділяється під час зародження мікротріщин так і вплив точкових дефектів, які утворились поблизу такої мікротріщини. Проте, якщо врахувати малі розміри точкових дефектів ($\sim 10^{-9}$ м), то для розрахунку калориметричного ефекту доцільно застосувати наступну модель теплового джерела:

$$Q(\vec{r}) = \sum c_i \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}_i) \quad (2.45)$$

де $\delta(\vec{r} - \vec{r}_i)$ - функція Дірака [79];

c_i - тепловий ефект утворення мікротріщини;

\vec{r}_i - розташування мікротріщини.

Дослідження дефектної мікроструктури металу [52] показують, що при пластичній деформації утворюються мікротріщини, поблизу яких спостерігається максимальне накопичення точкових дефектів, кількість яких зменшується в залежності від віддалі до мікротріщини. Тому, для математичних розрахунків доцільно припустити, що поширення тепла від джерела енергії можна описати за допомогою гаусівського розподілу.

Врахувавши вище наведене, рівняння для визначення джерела тепла буде мати вигляд [80]:

$$Q(\vec{r}) = \left(\frac{2}{\pi\sigma}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot P \cdot \exp\left(-2\frac{|\vec{r} - \vec{r}_0|^2}{\sigma}\right). \quad (2.46)$$

де P – потужність джерела тепла;

σ – середнє квадратичне відхилення;

\vec{r}_0 – положення джерела теплової енергії.

Задачею дослідження є визначення температурного розподілу на поверхні зразка у формі паралелепіпеда (рис.2.5).

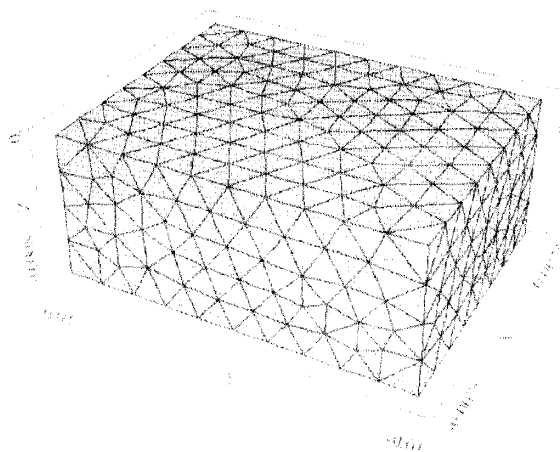


Рис. 2.5. Елемент зразка з ймовірною зоною утворення мікроефекту.

Таке формулювання задачі дослідження передбачає розв'язання рівняння теплопровідності (2.44) з відповідними початковими та краєвими умовами, що дозволяє визначити температурний розподіл на поверхні зразка та сформулювати основні вимоги до системи контролю.

2.5. Вимоги до системи контролю зародження та розвитку мікротріщин у тілі напружено-деформованих металічних конструкцій

Наведений вище теоретичний аналіз процесу пластичної деформації, як дисипативної структури, дасть можливість дослідити природу зміни енергетичних параметрів, що відбуваються в металах під час зародження несучільностей

кристалічної ґратки. Основною характеристикою дисипативних структур є перетворення (дисипація) повної механічної енергії у інші форми енергії, які у кінцевому рахунку, перетворюються в теплову. Механізми дисипації в металах базуються на наявності неоднорідностей кристалічної ґратки – дислокаційних структур або дислокацій.

Таким чином, одна з базових вимог до системи контролю зародження та розвитку мікротріщин у тілі напружено-деформованих конструкцій є забезпечення вимірювання температури (теплового ефекту), зміна якої супроводжує процес зародження та поширення мікротріщин.

Сформулюємо тепер основні вимоги до параметрів системи контролю температури на поверхні металоконструкції з точки зору діапазону вимірювання та необхідної чутливості системи на основі числового моделювання температурного розподілу.

Таке моделювання проведемо для зразків з конструкційних сталей Ст3, Ст20 та Ст45. Температура зовнішнього середовища 15°C .

Вважаємо, що до подачі навантаження у зразку спостерігається рівномірний розподіл температури:

$$T(x, y, z, 0) = 15. \quad (2.47)$$

Припускаємо, що два протилежні кінці зразка перебувають при сталій температурі, отже краєвими умовами є:

$$T(x, 5, z, t) = T(x, -5, z, t) = 15. \quad (2.48)$$

Враховуючи трансляційне переміщення дислокаційних структур при пластичній деформації металів, масштабний рівень мікрodefекту буде становити 10-200 мкм, а кількість теплоти, що виділяється під час утворення такого мікрodefекту буде дорівнювати 36-40 Дж для матеріалу сталі Ст20 та 27-34 Дж для матеріалу Ст45 [81]. Дія джерела, яке створює даний тепловий ефект, є короткочасною. Це дозволило розрахувати температуру на поверхні зразка в залежності від глибини залягання мікрodefекту [82]. Розрахунок проводився в середовищі програмного пакету Flex PDE версії 5 компанії PDE Solution Inc [83].

Розташування мікротріщини, зародження якої створює визначений калориметричний ефект, змінювалось по центральній вісі зразка у напрямку від верхньої до нижньої грані зразка з кроком 1 мм. За допомогою створеної програми було визначено температурні розподіли на верхній грані дослідного зразка, а також , максимальне значення температури у зоні ймовірного утворення мікротріщини. При заданому калориметричному ефекті під час зародження мікротріщини на різних глибинах її залягання температура на поверхні зразків змінюватиметься у межах:

- з матеріалу сталь Ст20 – від 24 до 21⁰С;
- з матеріалу сталь Ст45 – від 22,5 до 17⁰С.

Це дозволило за розрахунковими даними отримати залежності температури на поверхні зразка від глибини залягання мікротріщини по центральній осі які зображено на рисунках рис.2.6 та рис.2.7.

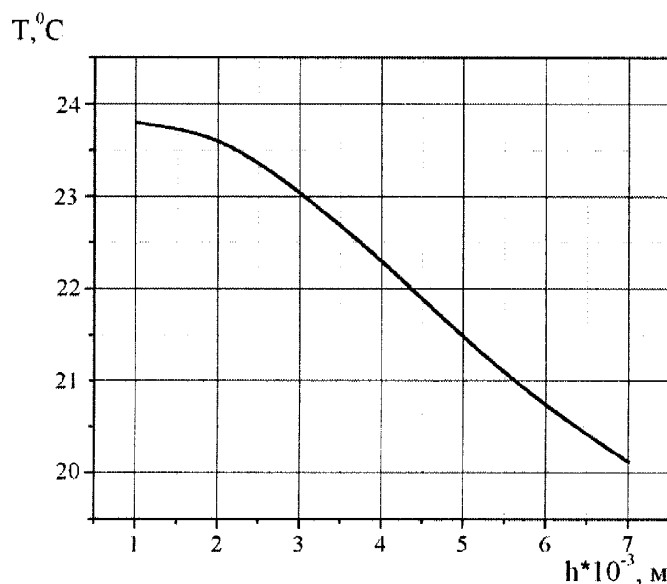


Рис.2.6. Залежність температури на поверхні зразка від глибини залягання мікротріщини по центральній осі (матеріал сталь Ст20).

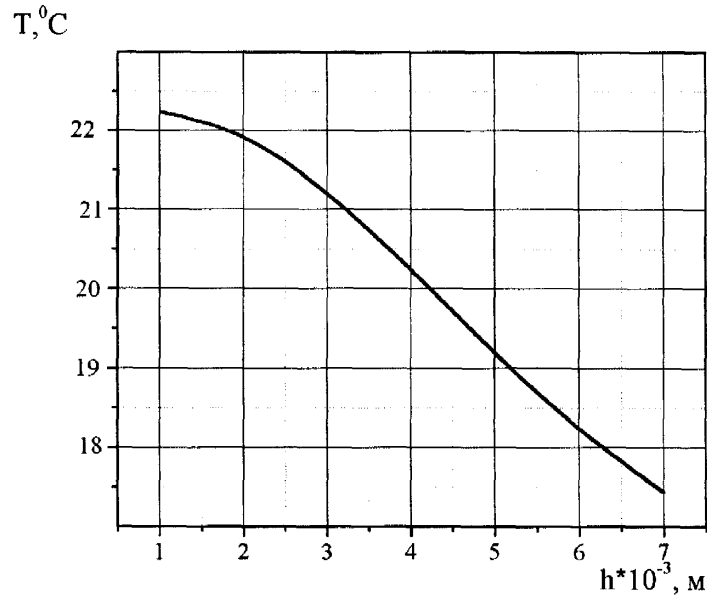
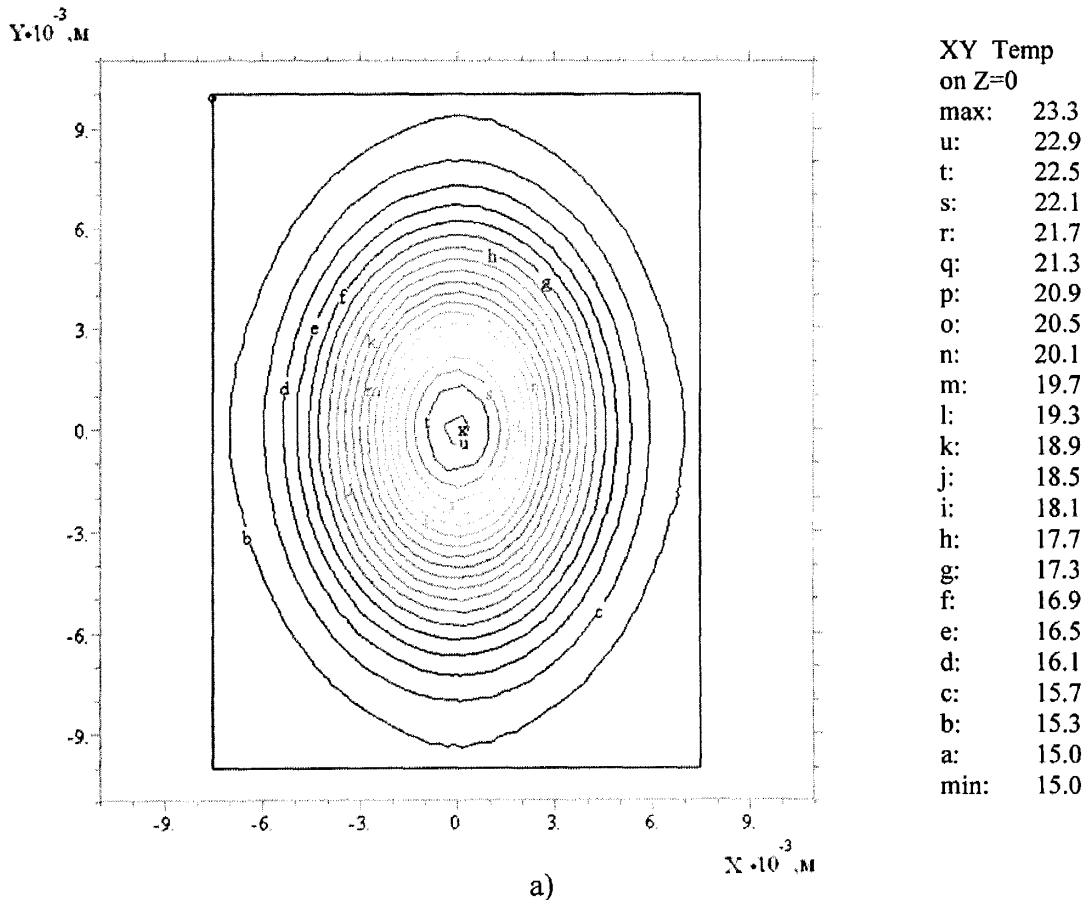
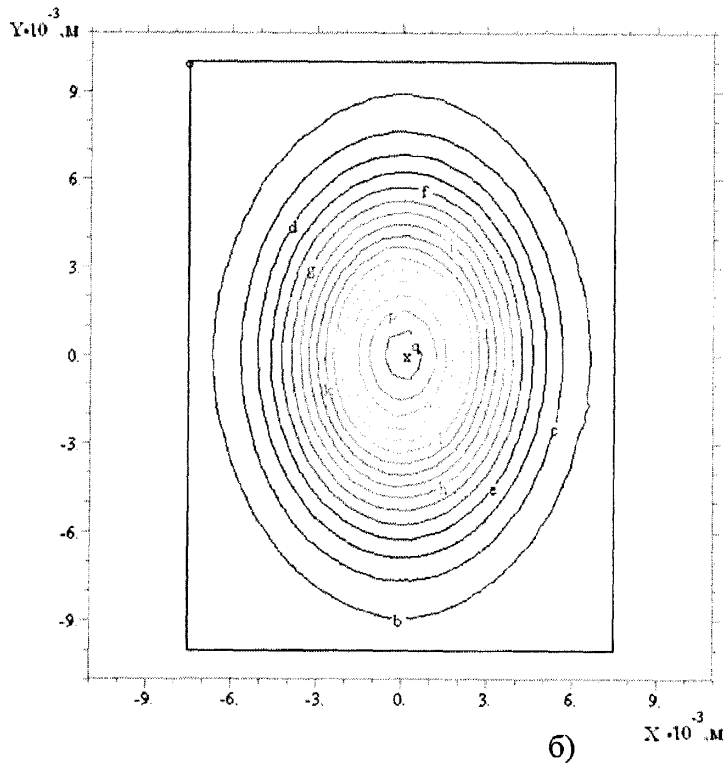


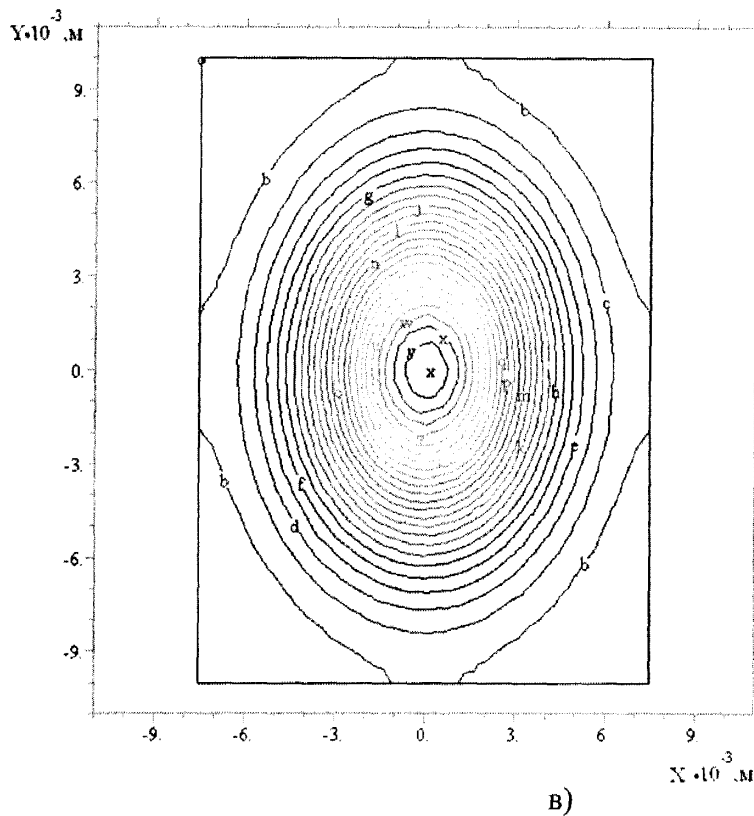
Рис.2.7. Залежність температури на поверхні зразка від глибини залягання мікротріщини по центральній осі (матеріал сталь Ст45).

Застосовуючи програму (додаток А), також, було визначено температурний розподіл по площі верхньої грані зразка в залежності від глибини залягання мікротріщини для різних типів матеріалів (рис.2.8 та рис.2.9) та додатки Б, В та Д .





| XY Temp on Z=0 | |
|-------------------|------|
| max: | 22.3 |
| q: | 22.0 |
| p: | 21.8 |
| o: | 21.5 |
| n: | 21.2 |
| m: | 20.8 |
| l: | 20.4 |
| k: | 19.0 |
| j: | 18.6 |
| i: | 18.2 |
| h: | 17.8 |
| g: | 17.4 |
| f: | 17.0 |
| e: | 16.6 |
| d: | 16.2 |
| c: | 15.8 |
| b: | 15.4 |
| a: | 15.0 |
| min: | 15.0 |

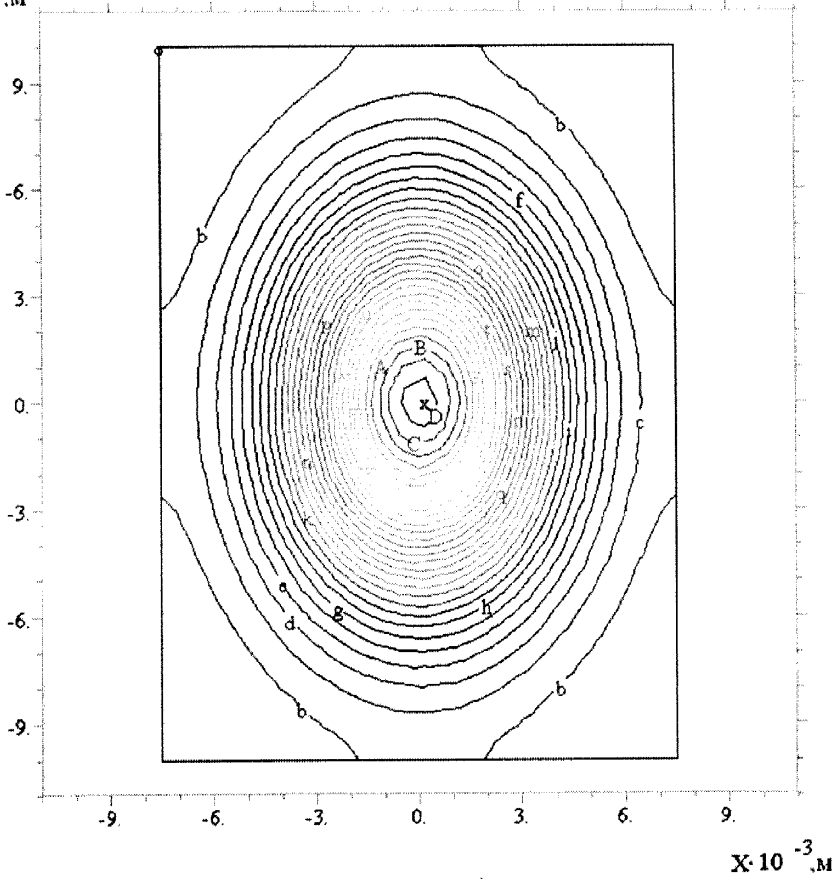


| XY Temp on Z=0 | |
|-------------------|------|
| max: | 21.2 |
| y: | 21.0 |
| x: | 20.8 |
| w: | 20.5 |
| v: | 20.2 |
| u: | 20.0 |
| t: | 19.8 |
| s: | 19.5 |
| r: | 19.2 |
| q: | 19.0 |
| p: | 18.8 |
| o: | 18.5 |
| n: | 18.2 |
| m: | 18.0 |
| l: | 17.8 |
| k: | 17.5 |
| j: | 17.2 |
| i: | 17.0 |
| h: | 16.8 |
| g: | 16.5 |
| f: | 16.2 |
| e: | 16.0 |
| d: | 15.8 |
| c: | 15.5 |
| b: | 15.2 |
| a: | 15.0 |
| min: | 15.0 |

Рис.2.8. Ізолінії температурного розподілу на поверхні зразка (сталь Ст20) 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.

$Y \cdot 10^{-3}, M$

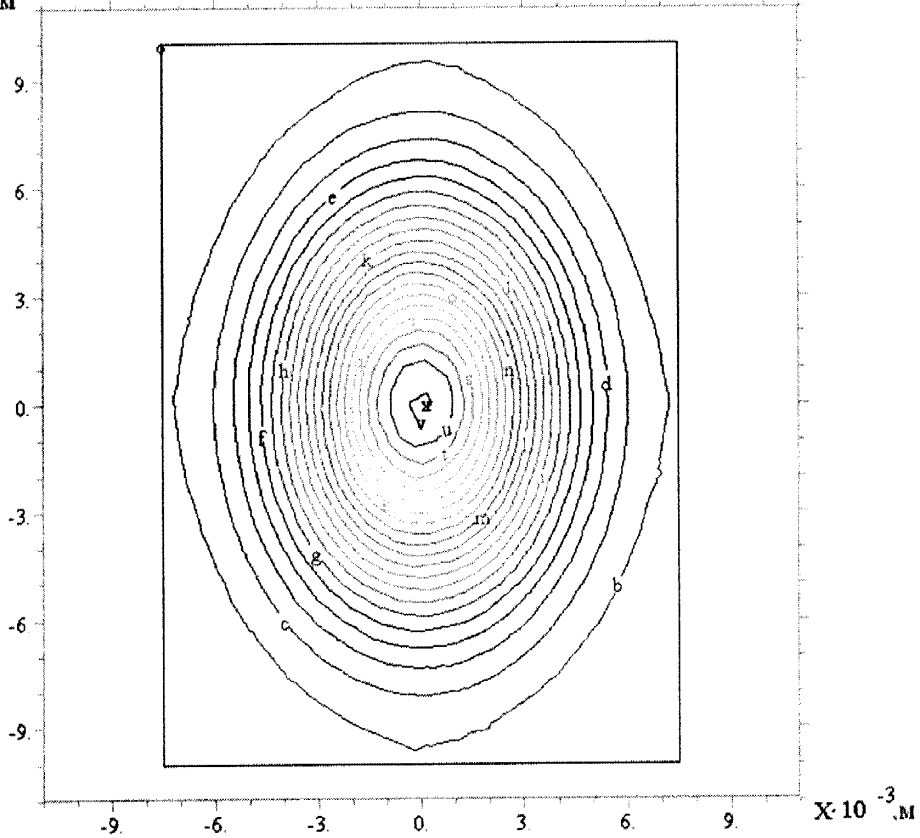


a)

XY Temp
on Z=0

| | |
|------|------|
| max: | 21.3 |
| D: | 21.0 |
| C: | 20.8 |
| B: | 20.4 |
| A: | 20.2 |
| x: | 20.0 |
| y: | 19.8 |
| v: | 19.6 |
| w: | 19.4 |
| u: | 19.2 |
| t: | 19.0 |
| s: | 18.8 |
| r: | 18.6 |
| q: | 18.4 |
| p: | 18.2 |
| o: | 18.0 |
| n: | 17.8 |
| m: | 17.6 |
| l: | 17.4 |
| k: | 17.2 |
| j: | 17.0 |
| i: | 16.8 |
| h: | 16.6 |
| g: | 16.4 |
| f: | 16.2 |
| e: | 16.0 |
| d: | 15.8 |
| c: | 15.6 |
| b: | 15.4 |
| a: | 15.2 |
| min: | 15.0 |

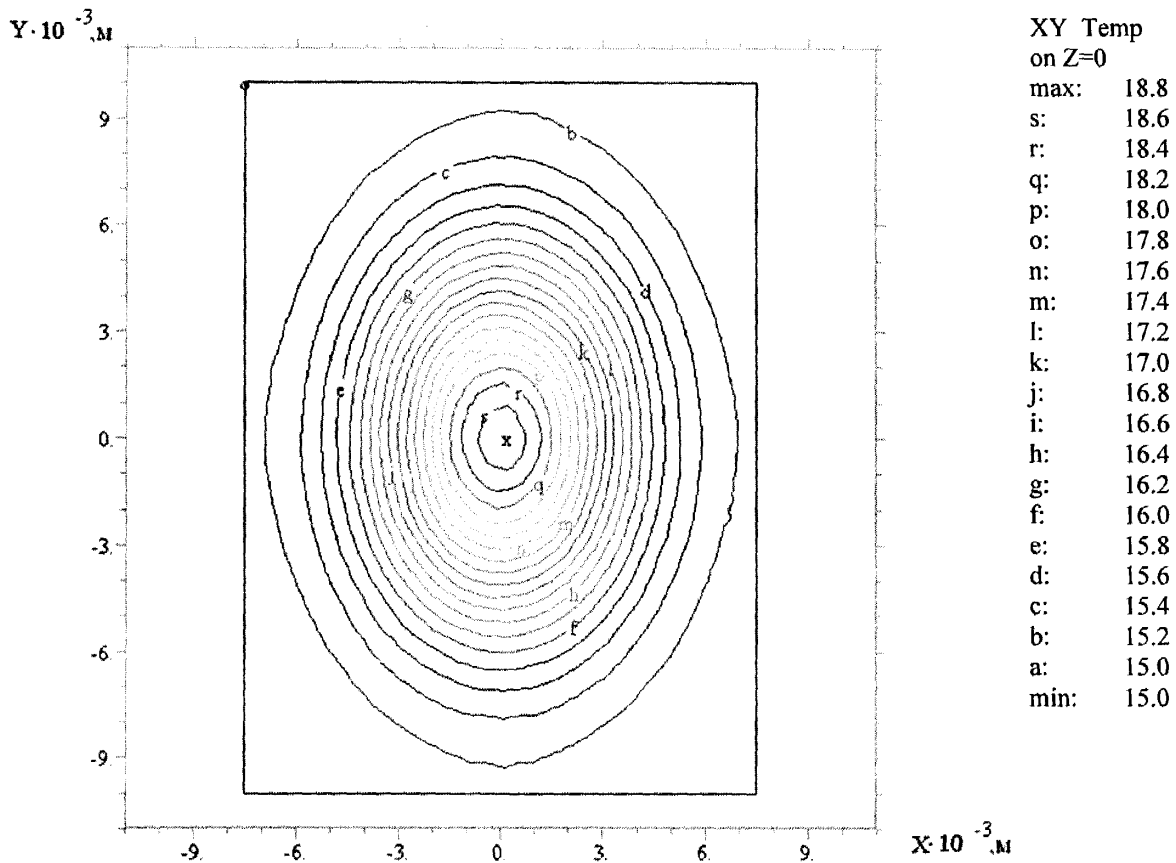
$Y \cdot 10^{-3}, M$



b)

XY Temp
on Z=0

| | |
|------|------|
| max: | 20.2 |
| v: | 20.0 |
| u: | 19.8 |
| t: | 19.6 |
| s: | 19.4 |
| r: | 19.2 |
| q: | 19.0 |
| p: | 18.8 |
| o: | 18.6 |
| n: | 18.4 |
| m: | 18.2 |
| l: | 18.0 |
| k: | 17.8 |
| j: | 17.5 |
| i: | 17.2 |
| h: | 17.0 |
| g: | 16.8 |
| f: | 16.5 |
| e: | 16.2 |
| d: | 16.0 |
| c: | 15.7 |
| b: | 15.5 |
| a: | 15.2 |
| min: | 15.0 |



в)

Рис.2.9. Ізолінії температурного розподілу на поверхні зразка (сталь Ст45) 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.

У додатках Б, В та Д, також, наведено ізолінії температурних розподілів по горизонтальній та вертикальній площях перерізу зразка, в залежності від місця розташування мікротріщини.

Таким чином можна зробити висновок, що система контролю повинна забезпечувати вимірювання температури при її зміні на 5°C при початкових значеннях від 0° до $+60^{\circ}\text{C}$.

Перейдемо тепер до формулювання необхідних динамічних характеристик системи контролю. Процес утворення та розвитку мікротріщин носить стрибкоподібний характер, що, з врахуванням теплової інерції металу конструкції

вимагає здійснювати контроль температури в динамічному режимі. Значить, система повинна характеризуватись сталими часу в межах 1-2с.

Як було встановлено вище, застосування фрактальної теорії дозволяє оцінювати не тільки процес зародження але й розвиток мікротріщин. Таким чином система контролю повинна мати програмне та технічне забезпечення для числового моделювання процесу розвитку мікротріщин на основі засад фрактальної геометрії.

Висновки до розділу 2

Розглянуто універсальні властивості відкритих систем, в процесі еволюції яких відбувається обмін енергією з оточуючим середовищем, ефекти самоорганізації дисипативних структур, їх фрактальна розмірність.

Встановлено, що деформоване тверде тіло доцільно розглядати з позиції синергетики як дисипативну систему, яка характеризується спонтанною перебудовою дислокаційних структур в процесі пластичної деформації. Руйнування при цьому трактується як нерівноважний фазовий перехід кристалічної фази в квазіаморфну, а з квазіаморфної в деструктивну.

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 несучільностей, що супроводжується стрибкоподібним підвищенням температури металу конструкції.

Показано, що існує структурно-енергетична аналогія між процесами плавлення та руйнування металів.

Розроблено термодинамічну модель, що дозволяє оцінювати зміну температури на поверхні металічної конструкції в момент зародження мікротріщини.

Отримано температурні розподіли по площі верхньої грані та по горизонтальній і вертикальній площах перерізу зразка в залежності від глибини залягання мікротріщини дозволили побудувати залежності зміни температури від глибини залягання мікротріщини.

Сформульовано вимоги до системи контролю розвитку мікротріщин у тілі напружено-деформованих металічних конструкцій за зміною температури на їх поверхнях.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗАРОДЖЕННЯ ТА РОЗВИТКУ МІКРОТРИЩИН У НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛІЧНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

З метою підтвердження отриманих висновків в попередніх розділах про можливість контролю моменту зародження мікротріщин у металічних конструкціях, що перебувають у напружено-деформованому стані за стрибкоподібною зміною температури на їх поверхні, необхідно розробити технічний засіб контролю, що дозволяє вимірювати температуру у визначеному діапазоні зміни температур, провести експериментальні дослідження з встановлення залежності зміни температури на поверхні тіла від прикладеного навантаження та оцінити достовірність отриманих результатів.

3.1. Обґрунтування вибору термодавача системи контролю

На даний час на ринку Західної Європи існує близько 9000 моделей сенсорів для вимірювання температури [84]. До існуючих мікроелектронних сенсорів відносяться: напівпровідникові, тонко - і товстоплівкові, п'єзоелектричні, оптоелектронні, волоконно - оптичні. У загальному обсязі виробництва мікроелектронних сенсорів домінують перші три типи сенсорів, а за даними західної статистики в якості мікроелектронних фігурують часто тільки напівпровідникові сенсори, оскільки це обумовлено високою розвиненістю твердотільної технології і її широких можливостей.

Для вимірювання температури на даний час широко застосовуються напівпровідникові або мікроелектронні сенсори, інфрачервоні сенсори, термометри опору, термістори, термопари.

Виробниками напівпровідникових сенсорів температури є фірми Analog Devices, National Semiconductor, Dallas Semiconductor та інші. Analog Devices займається розробкою і випуском температурних сенсорів з виходом по струму або напрузі, сенсори з перетворенням температури в часовий інтервал або цифровий код, сенсори з функціями контролера, вимірювальні вторинні перетворювачі для підключення термопар і термометрів опору [85].

У термосенсорах, які виконані за інтегральною технологією, як термочутливий елемент використовується інтегральна мостова диференціальна схема. В якості термочутливих елементів є кремнієві транзистори, що працюють у нижніх плечах моста. В інтегральній схемі з термочутливими транзисторами, здійснюється перетворення різниці напруг емітер-база у вихідний струм, величина якого пропорційна температурі. Шляхом лазерного припасування відповідних опорів у технологічному процесі виробництва інтегральної схеми, забезпечується необхідна точність перетворення температури у вихідний сигнал і вихідні параметри термочутливої схеми.

У [84] розглянуто інтегральні термосенсори фірми Analog Devices типу AD590, що працюють за таким принципом. Схема термосенсора "температура - струм" має два виводи і може бути показана як термозалежний високоомний опір. Струм мікросхеми в діапазоні напруг 4..30 В не залежить від напруги і є лінійною функцією температури з величиною перетворення $k = I_{вих}/T = 1 \text{ мкА}/^{\circ}\text{C}$. Термосенсори AD590 застосовують як первинні перетворювачі, а вторинними перетворювачами є різноманітні операційні підсилювачі, вхідний сигнал для яких подається з послідовно включеного з термосенсором опору.

Сенсори "температура - напруга" являють собою інтегральну схему, що містить термочутливий сенсор (аналогічний термосенсору AD590) і операційний підсилювач. Характеристики такого термосенсора визначаються термочувливим елементом і коефіцієнтом підсилення операційного підсилювача [84].

В якості сенсорів "температура - тривалість імпульсу" застосовують інтегральну схему, що здійснює перетворення температура-напруга, і включає широтно-імпульсний модулятор. Шляхом перерахування тривалості імпульсу і паузи в температуру, визначається температура контрольованого середовища. Зовнішній генератор стабільної частоти і мікропроцесор здійснюють вимірювання тривалості.

Фірма Dallas Semiconductor випускає цифрові температурні сенсори DS16(20-25) і DS1820/21, що призначені для вимірювання температури навколишнього середовища в діапазоні від $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вони відрізняються високою точністю вимірювань ($\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в діапазоні температур від 0 до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ і роздільною здатністю перетворення $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) [86].

Для вимірювання температури поверхні застосовуються терморезистори, оскільки вони мають малі габарити, високу чутливість і низьку вартість. У [87] проведено аналіз терморезисторів, що розроблені на основі тонких шарів напівпровідникових матеріалів зі змішаних окислів перехідних металів. Ці терморезистори виготовлені на ситалових підкладках. До необхідного значення опір заготівок підганяється лазерною різкою частини напівпровідникового шару між електродами з урахуванням температури підкладки, що дає можливість зменшити розкид опору до 1.. 2 %. Такі терморезистори зручні для вимірювання температури поверхні, тому що їхні виводи розташовуються з однієї сторони підкладки і вони можуть кріпитися до поверхні об'єкта контролю методом приклеювання. Розроблені терморезистори мають високу експлуатаційну стабільність і за максимальною робочою температурою $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ фактична зміна опору не перевищує $\pm 2\text{ }%$ [87].

На основі базової мікроелектронної технології, на даний час, розроблено конструкції товстоплівкових терморезисторів з напівпровідникових матеріалів на основі оксидів марганцю, кобальту і нікелю, що формуються на підкладках з алюмооксидної кераміки. Представником такої технології є терморезистор типу TP-5, що має різнонаправлені виводи довжиною 10^2 мм і товщиною 0,1 мм з мідного дроту, гальванічно покритого сплавом олова з вісмутом. Він в

основному призначений для використання в гібридних інтегральних мікросхемах і пристроях мікроелектроніки для вимірювання, контролю і регулювання температури, термостабілізації, термокомпенсації, а також ефективно застосовується як чутливий елемент контактних сенсорів температури поверхні твердих тіл [88].

Для вибору термодавача за літературними даними [89, 90, 91] було проаналізовано такі прилади для вимірювання температури твердих тіл: термоперетворювачі серій ТС60, ТС70 (виробник НПП «Дано - Терм», Росія), термоелектричні перетворювачі типу КТХА, КТХК (термопарні щупи) (НВФ «КонтрАвт», Росія) та термодавачі типу ТТР та DS вітчизняного виробництва.

Термоперетворювачі серії ТС60 та ТС70 характеризуються значною інерційністю, та значними габаритними розмірами.

Термоперетворювачі серії ТС60 призначені для вимірювання температури поверхні твердих тіл в діапазоні від -50 до $+150^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнт теплової інерції даних термоперетворювачів - до 30с.

Лінійні розміри термоперетворювачів серії ТС70 сягають $10 \times 20 \times 5$ мм. Такі давачі бувають виготовлені з міді (діапазон робочих температур від -50 до $+200^{\circ}\text{C}$) та алюмінієвого сплаву Д16 (діапазон робочих температур від -50 до $+400^{\circ}\text{C}$). Значення теплової інерції таких давачів досягає 30с.

Термоперетворювачі типу КТХА та КТХК призначені для вимірювання твердих тіл контактним методом, чутливий елемент виготовлено з термопарного кабеля діаметром 1,5-4мм, армований сталевими трубками. Час термічного спрацьовування таких термоперетворювачів є досить значним: в залежності від конструкції виготовлення робочої частини термоперетворювача знаходиться в межах 2,5-25 с. Крім того, ці засоби мають значні габарити. Зокрема, діаметр робочої частини становить від 17мм до 1,5 мм.

Аналізуючи більш повно характеристики існуючих чутливих елементів для вимірювання температури, перевага була віддана давачу температури, типу DS, якому характерні ряд переваг, а саме: багатофункціональність, висока точність, мала інерційність, висока швидкодія, малі габаритні розміри і маса,

тонкі і гнучкі виводи, а також лінійна залежність опору від температури у відносно широкому діапазоні [91].

На сьогоднішній день високоточні термодавачі виготовляють з германію (з діапазоном вимірювання 0,005-100⁰ К), вуглецевого скла (1,4-325⁰ К) і платини (14 – 800⁰ К). Щоб виготовити термодавачі для вимірювання в діапазоні температур від 2 до 600⁰К використовують германієві плівки на підкладках з арсеніду галію. Загалом високочастотні термодавачі – це результат останніх вітчизняних досягнень, що базуються на гетеро – структурі Ge/GaAs [92]. Принцип проектування таких давачів і технологія їх виготовлення детально описано в [93].

На рис.3.1 зображено чутливий елемент термодавача розмірами 0,3×0,3×0,2 мм, що встановлений у немагнітному корпусі розміром Ø 1,2×1,0 мм. Конструкцію даного термочутливого елемента зображено на рис. 3.2 [92]. Температурний чутливий елемент (4) розміщується в трубці з оксиду алюмінію (3), яка закупорена ковпачком з міді (1, 5). Електрично вони з'єднані золотою контактною поверхнею (2), що становить 30 мкм. Мідні провідники (6) запаяні в ковпачки (7).

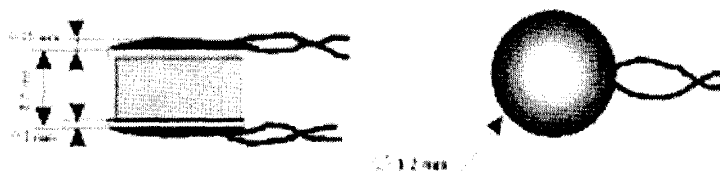


Рис 3.1. Чутливий елемент термодавача.

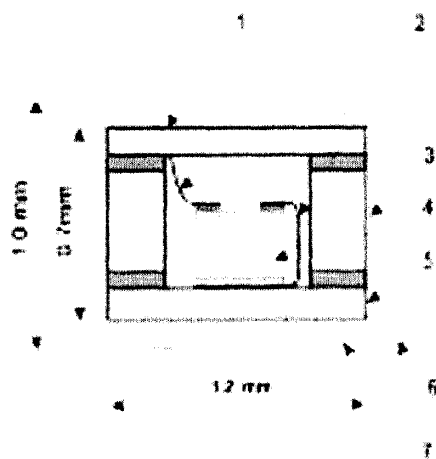


Рис. 3.2. Конструкція термочутливого елемента.

Дослідження якості виконання мікродавачів здійснюється за допомогою атомно-силового мікроскопу (рис. 3.3) [94].

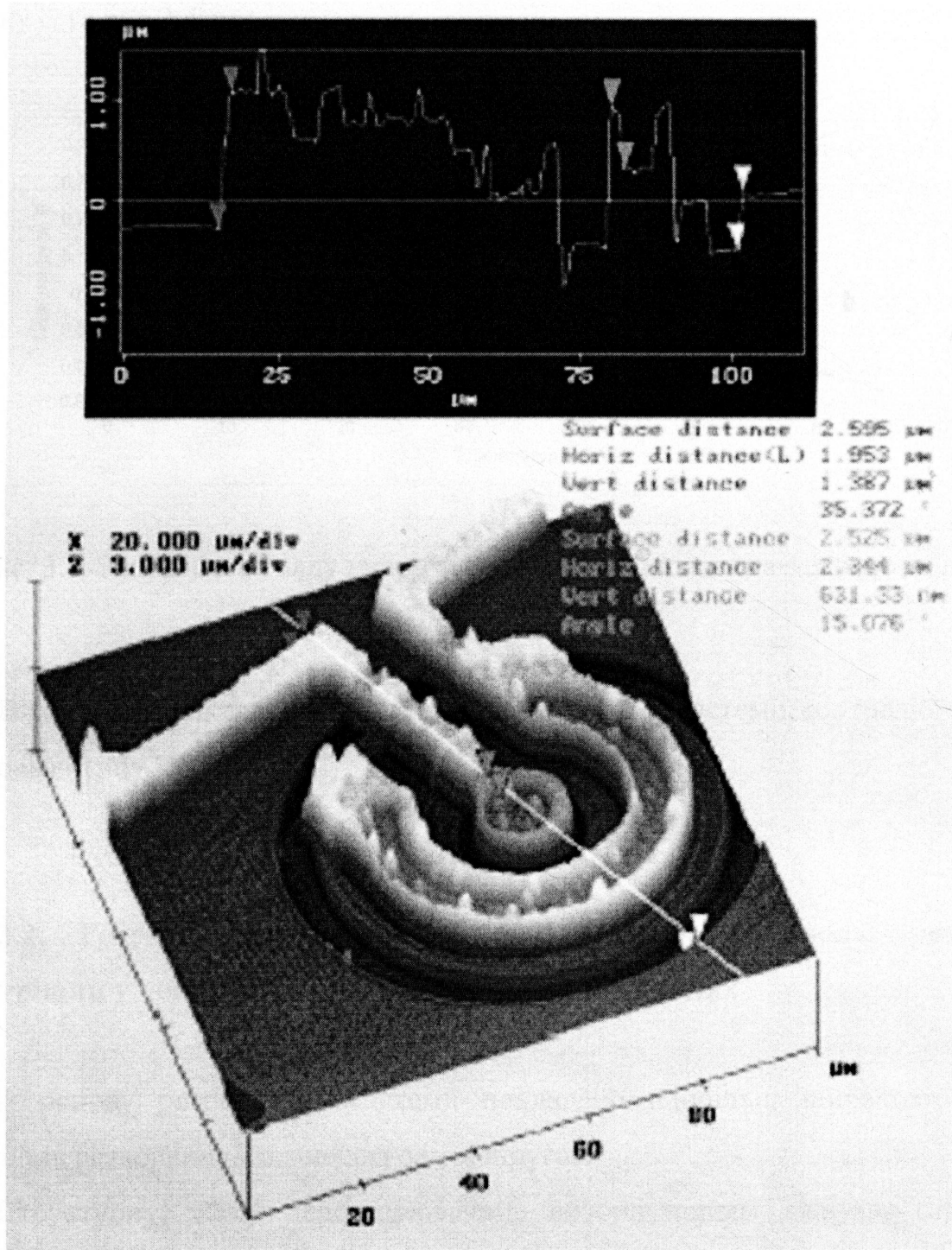


Рис. 3.3. Структура мікротермодавача.

Градувальна характеристика термодавачів типу DS є досить плавною і за виглядом наближається до лінійної, а тому і результати вимірювань є чітко прогнозованими [95]. Градувальні дані термодавача DS-1A №022 наведено у додатку Е та рис.3.4.

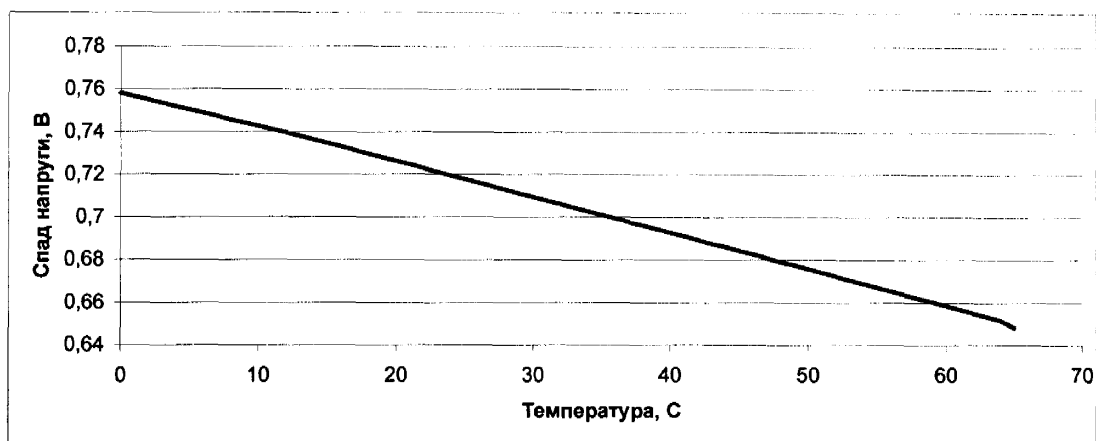


Рис. 3.4. Залежність спаду напруги на мікротермодавачі в залежності від температури.

Виходячи з викладеного, в якості термодавача системи контролю обрано термодавач типу DS.

3.2. Розробка структурної схеми системи контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях

В основу розробленої системи покладено найбільш широковживаний принцип перетворення «температура – напруга».

Структурну схему перетворювача з використанням джерела струму і диференційного підсилювача наведено на рис. 3.5.

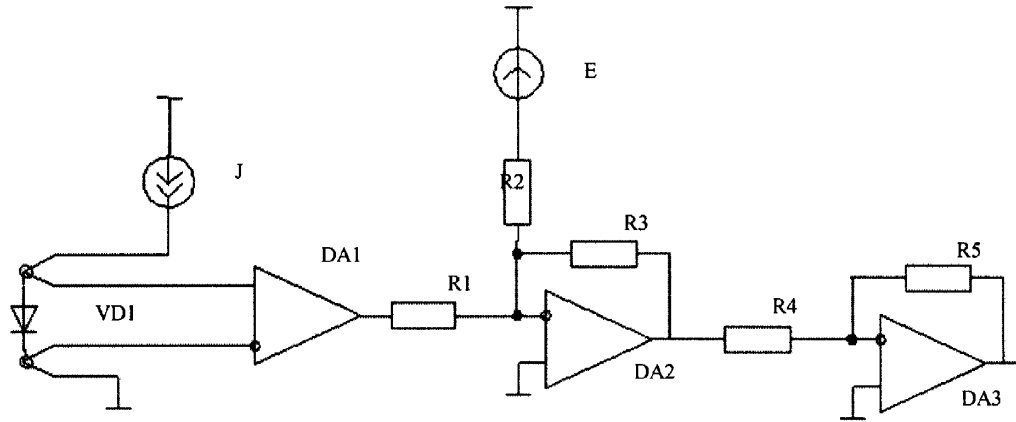


Рис. 3.5. Структурна схема перетворювача "температура-напруга" з використанням напівпровідникового давача температури.

Для збільшення динамічного діапазону вимірювального сигналу забезпечується компенсація спаду напруги на перетворювачі при температурі 0°C . Таким чином вихідна напруга буде пропорційною температурі.

Коефіцієнт підсилення диференційного підсилювача вибрано 10. Таким чином на його виході буде напруга від 7,58 В (при 0°C) до 6,5В (при 65°C).

Для компенсації напруги 7,58 В використовується різницевий підсилювач. Вхідні струми від джерела опорної напруги і з виходу диференційного підсилювача підбираються таким чином, щоб вони були протилежного знаку і однакові за модулем при температурі 0°C .

На виході різницевого підсилювача напруга буде знаходитись в межах від 0 В (при 0°C) до $-1,08\text{В}$ (при 65°C). При робочих вимірюваних температурах з метою збільшення вихідної напруги і приведення її до стандартної величини 10В після різницевого підсилювача слід встановити інвертуючий підсилювач з коефіцієнтом підсилення 10 [96].

В результаті, при вимірюванні температури напівпровідниковим давачем від 0°C до 59°C на виході перетворювача буде напруга від 0В до 10В.

Для створення джерела опорного струму в 100 мкА було використано мікросхему REF200 (Texas Instruments), яка містить схему двох прецизійних джерел струму на 100 мкА.

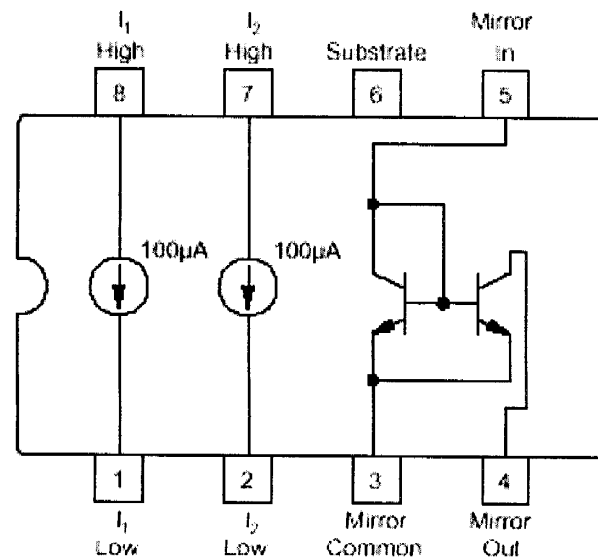


Рис.3.6. Структурна схема джерела опорного струму на базі мікросхеми REF200.

Диференційний підсилювач повинен підсилювати різницеву складову напруги в 10 разів. Тому вибираємо інструментальний підсилювач типу INA141 (Texas Instruments), який забезпечує стабільний коефіцієнт підсилення 10.

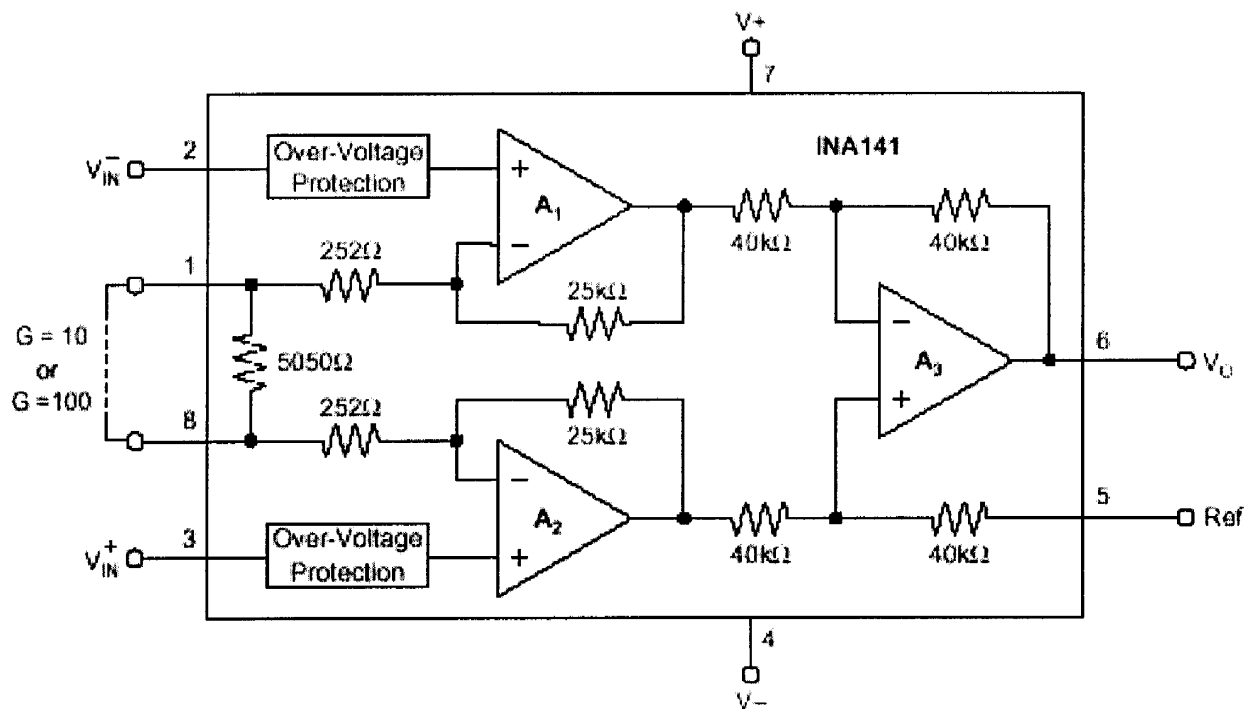


Рис. 3.7. Структурна схема інструментального підсилювача INA141.

Для усунення напруги потенційного бар'єру $p-n$ переходу напівпровідникового датчика необхідно відняти 7,58В. Для цього

використовується різницевий підсилювач на прецизійному операційному підсилювачі ОРА177 (Texas Instruments). При цьому вихідна напруга із попереднього каскаду за допомогою резистора, включеного до входу операційного підсилювача, перетворюється в струм 100 мкА. Для цього резистор повинен бути $7,58\text{В}/0,0001\text{А}=75800\ \text{Ом}$. Для створення опорного струму 100 мкА використовується одне з опорних джерел REF200.

Для передачі результатів вимірювання на відстань вихідний сигнал повинен бути порядку 4-20мА. Для цього використовується перетворювач напруги в вихідний струм типу ХТR110 (Texas Instruments).

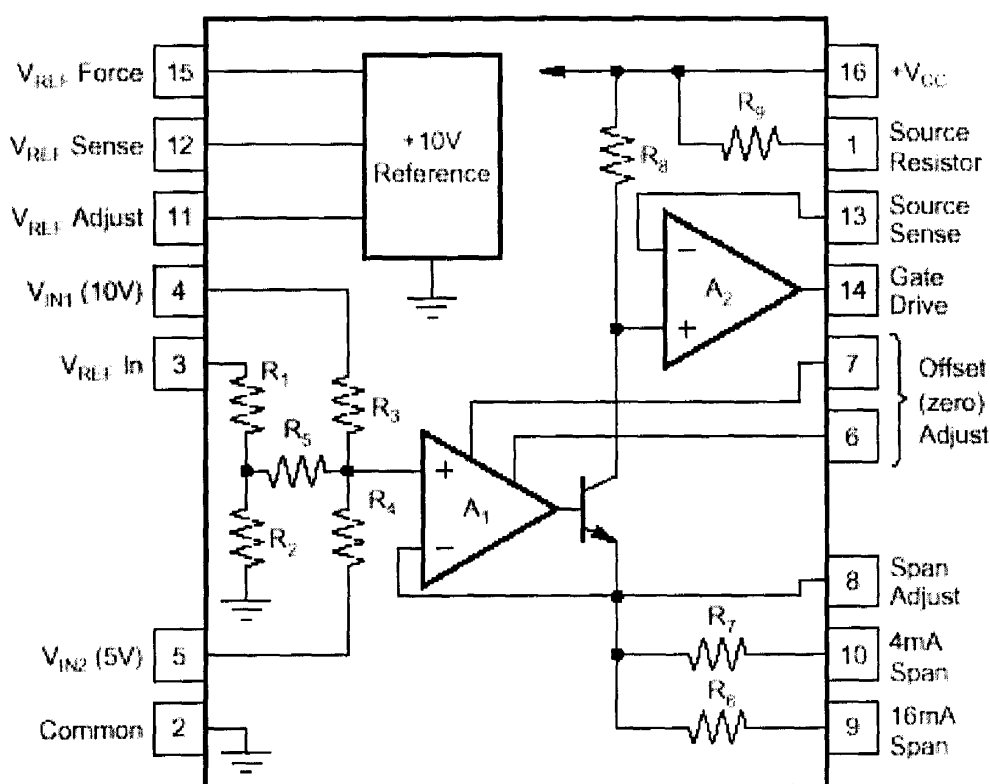


Рис. 3.8. Структурна схема перетворювача напруги в струм 4-20мА.

Перетворення температури у напругу здійснюється згідно розробленої схеми, що наведена на рис.3.9.

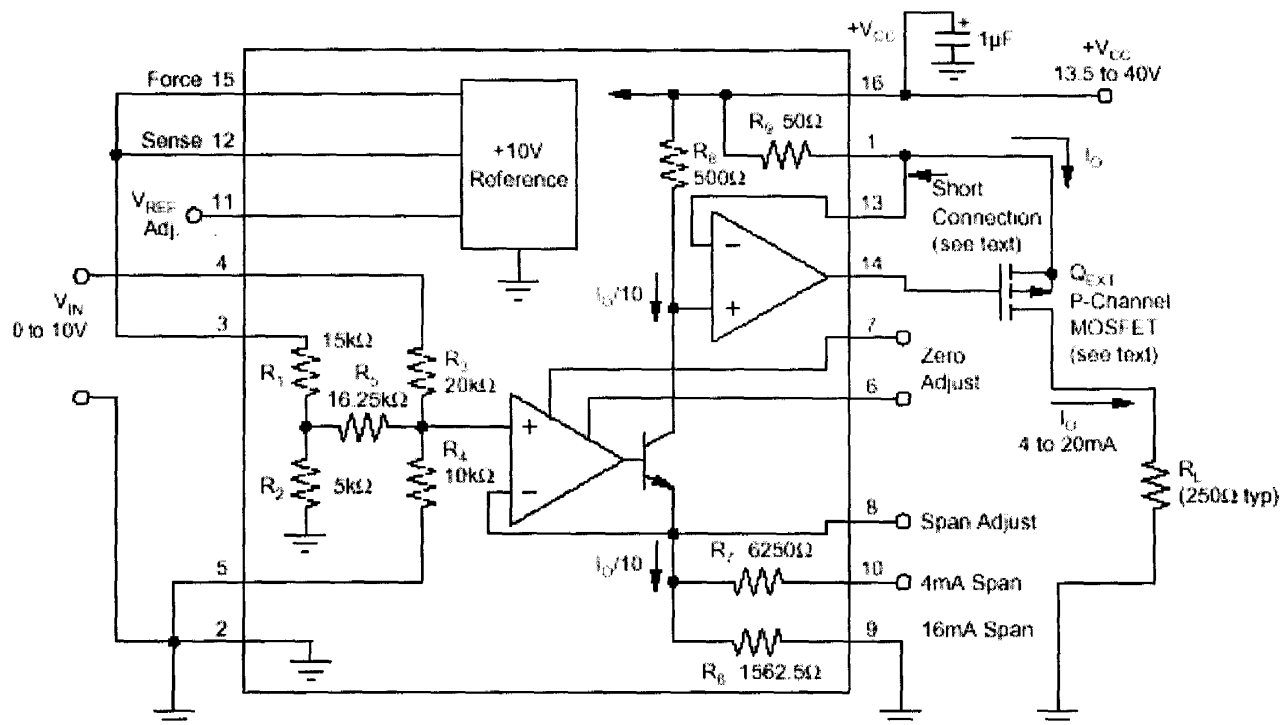


Рис.3.9. Схема перетворення температури у напругу.

Для дискретизації аналогового сигналу використано вузол збору даних на основі мікросхеми аналого-цифрового перетворювача (АЦП) AD7715 (Analog Devices). Схему вузла наведено на рис.3.10.

Для захисту від комутаційних струмів входи мікросхеми AD7715 буферовано резисторами і шинними формувачами. Для запобігання надлишкового вихідного струму AD7715 також використано буфер. Зменшення рівня вхідних та вихідних струмів зменшує перехресні завади в самій мікросхемі AD7715.

Вхідний сигнал з перетворювача температури у вигляді струму, протікаючи через опорний резистор величиною 474,5 Ом, перетворюється в напругу і поступає на вхід аналого-цифрового перетворювача. Таким чином, на вході АЦП (при діапазоні зміни струму від 0 до 5 мА) забезпечується напруга від 2,3725 до 0 В. Ця напруга дискретизується 16-ти розрядним АЦП. Дискретність наведених значень при опорній напрузі 2,5В буде становити 38мкВ. Мікросхема AD7715 може працювати в режимі однополярного або двополярного вхідного сигналу. У випадку двополярного вхідного сигналу

старший розряд АЦП використовується як знаковий. Тому на результат відводиться 15 розрядів.

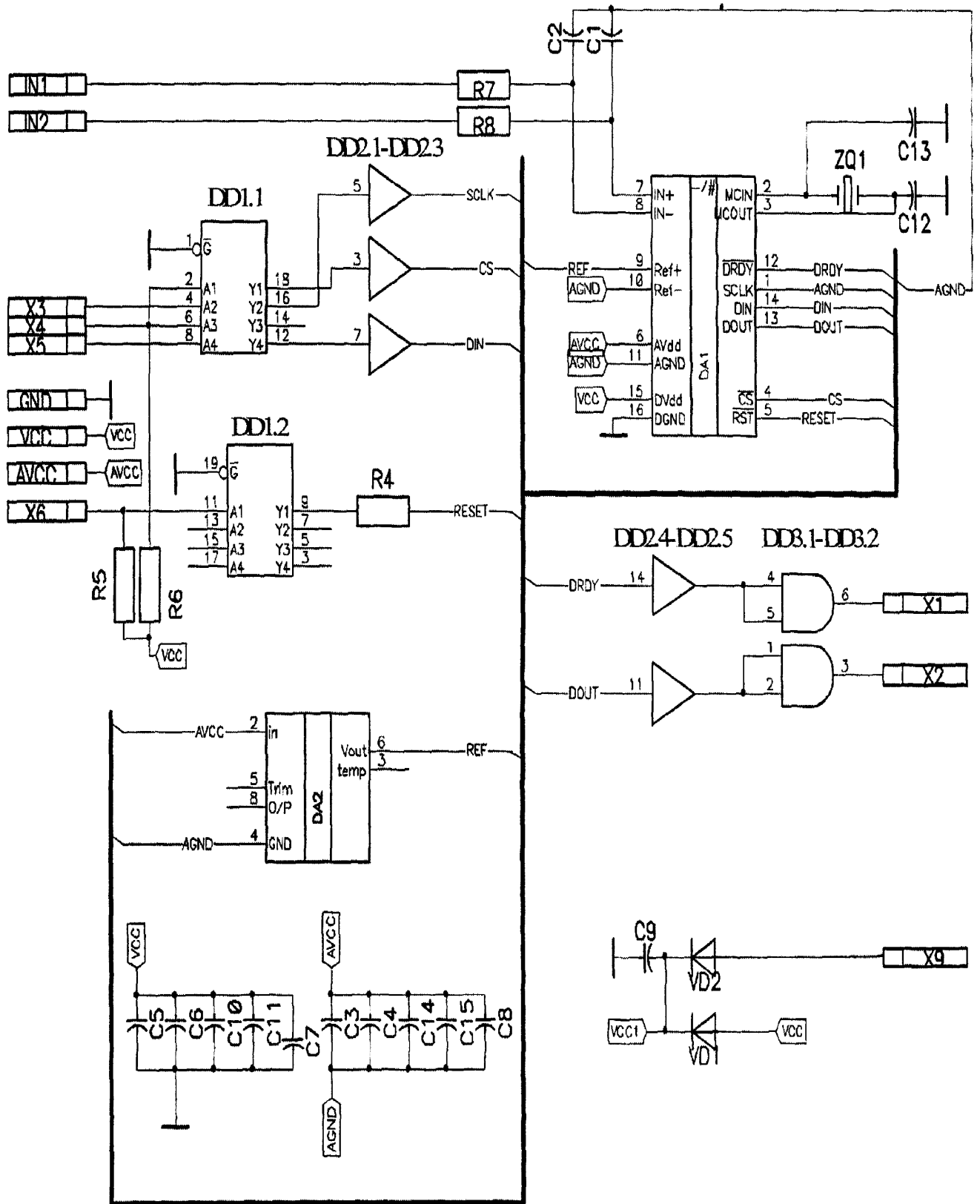


Рис.3.10. Схема вузла збору даних на основі мікросхеми AD7715.

При зміні температури від 50°C до 0°C напруга на виході перетворювача буде змінюватись від 0 до 10В, а струм - від 0 до 5 мА. Струм, протікаючи через опорний резистор в блоці обробки сигналу, перетворюється у напругу від 0 до 2,3725 В.

Режим двополярного вхідного сигналу дозволить розширити діапазон вимірювання температури.

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

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

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 слід проаналізувати залежність цифрового коду K та напруги від вимірюваної температури (рис.3.11)

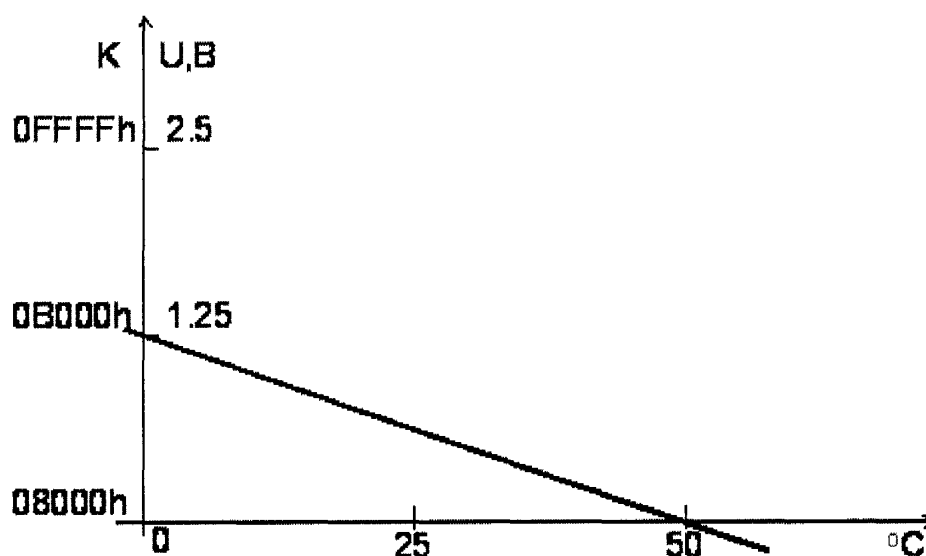


Рис.3.11. Залежність цифрового коду K та напруги U від вимірюваної температури.

Тоді, для напруги 2,3725В цифровий код можна визначити як:

$$K = 32768 + \frac{2,3725}{2.5} \cdot 32768 = 63864$$

Перевести код K , отриманий в результаті дискретизації в температуру t , враховуючи його отримане значення 63864 і $08000h = 32768$, можна таким чином:

$$t = 102.69 - 0.001608 \cdot K .$$

Вигляд пристрою перетворення температури в струм зі знятою кришкою показано на рис.3.12. 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.

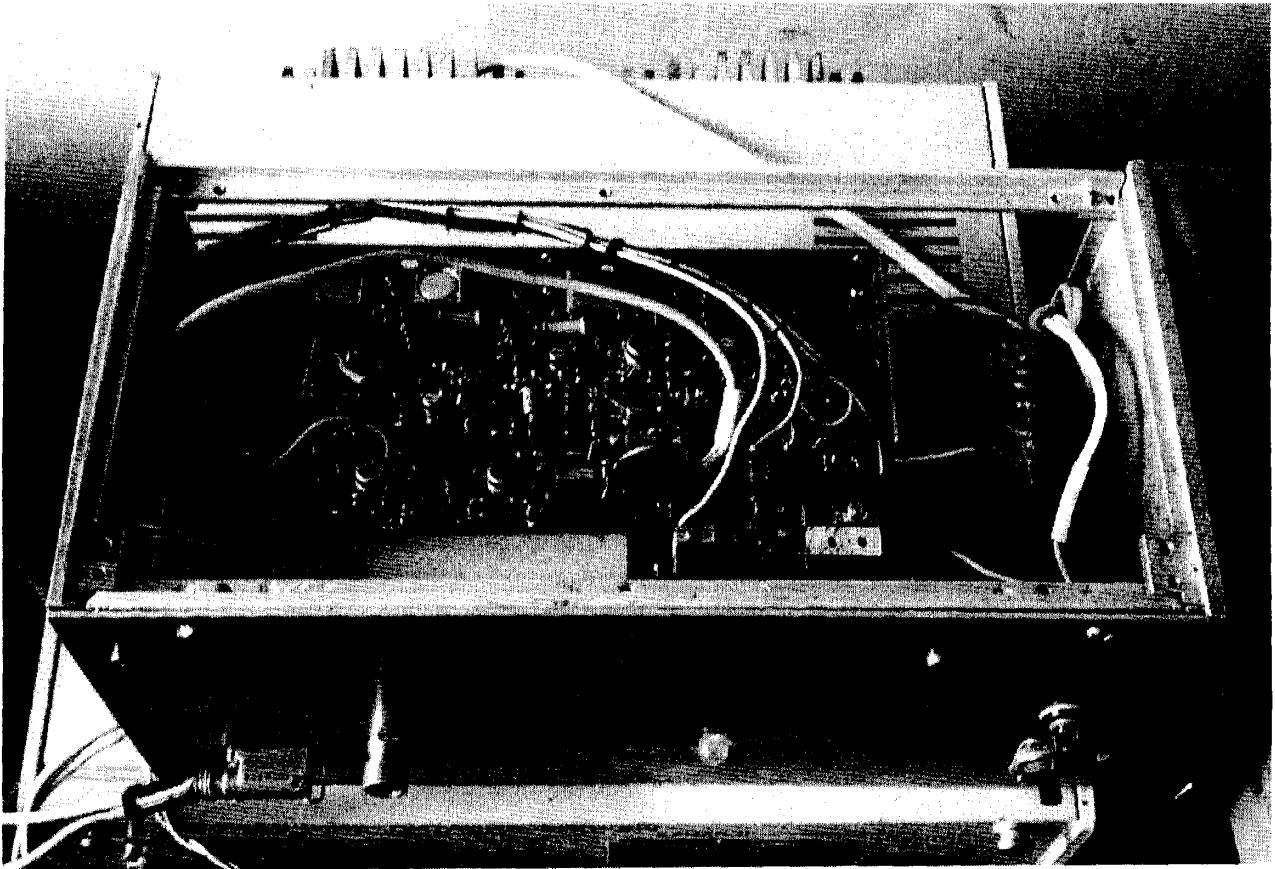


Рис. 3.12. Вигляд пристрою перетворення температури в струм.

Вигляд вузла дискретизації показано на рис.3.13.

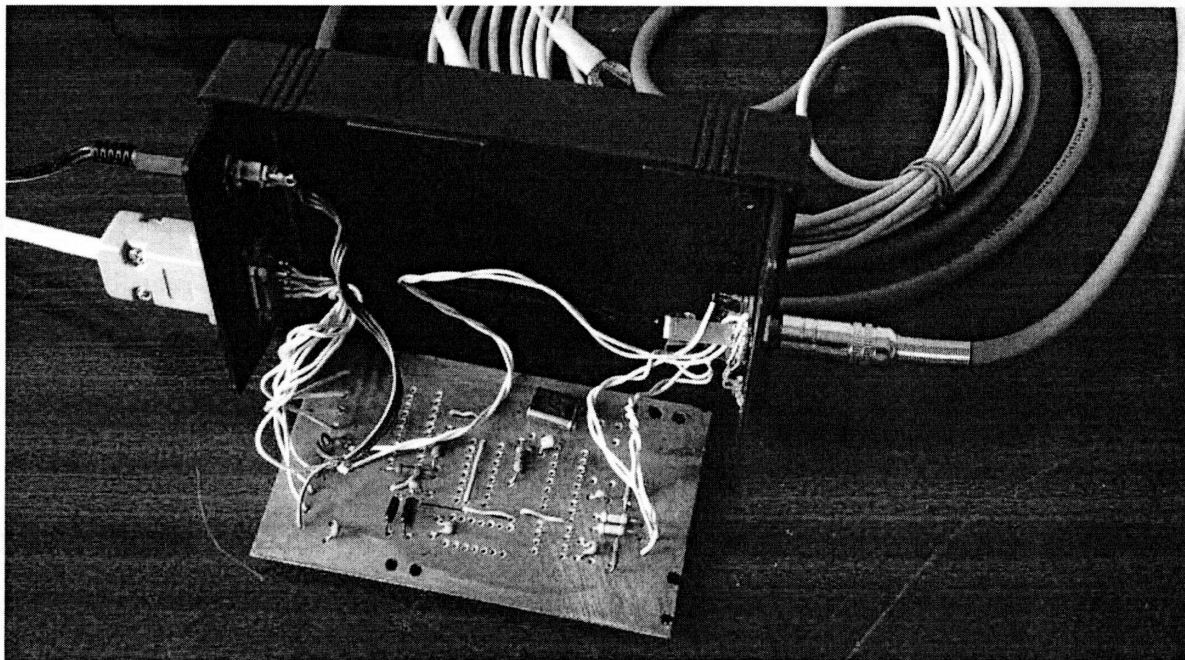


Рис.3.13. Вигляд вузла дискретизації.

Для кращого захисту від перехресних і комутаційних завад одна сторона друкованої плати, на якій змонтовано вузол, має суцільне металеве покриття [97]. Це покриття приєднано до виводу “цифрова земля”. З’єднання “цифрової землі” та “аналогової землі” здійснено перемичкою біля 11 виводу мікросхеми AD7715.

Вид вузла з боку монтажу мікросхем показано на рис.3.14.

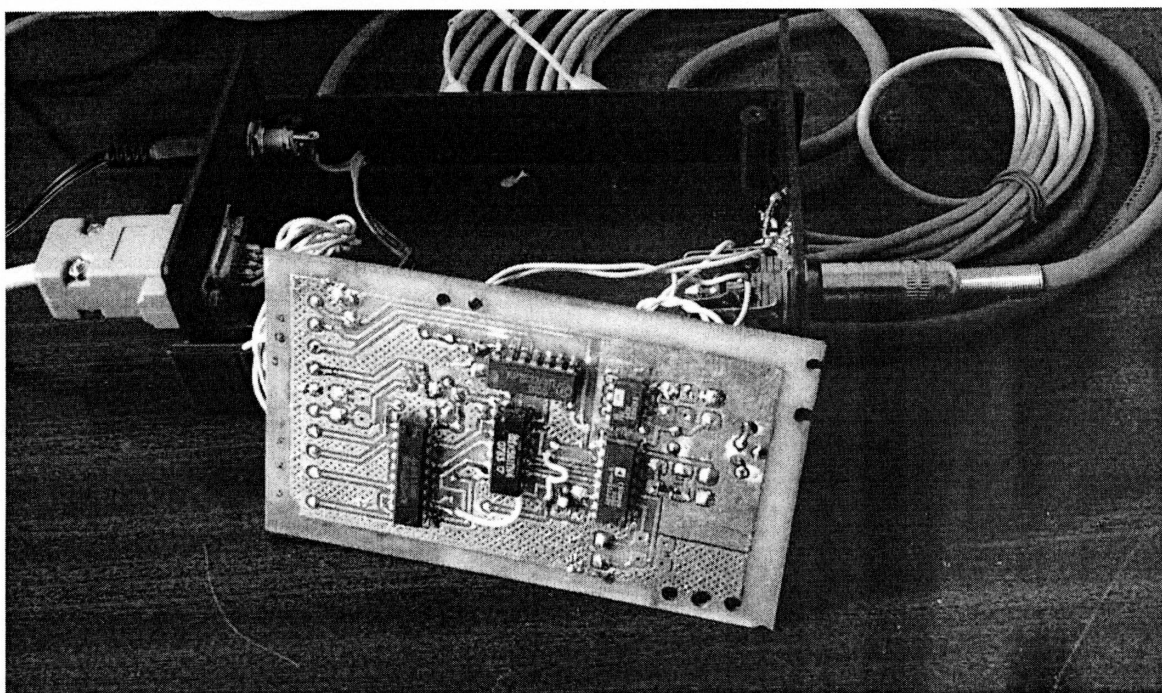


Рис.3.14. Вузол дискретизації з боку монтажу мікросхем.

Для запобігання коробленню матеріалу друкованої плати, шини “цифрової землі” виконано у вигляді сітки.

Розроблений засіб змонтовано в корпус з габаритними розмірами $300 \times 200 \times 165$ мм.

Прийняті схемотехнічні рішення дозволили реалізувати такий засіб, який дозволяє контролювати зміну температури на поверхні тіла у діапазоні від 0° до 60°C , має малу інерційність та високу швидкодію.

Для реалізації системи контролю в цілому використано аналого-цифрове перетворення, а реєстрація результатів вимірювання температури реалізована з використанням ПЕОМ, програмне забезпечення якої дозволяє виділити як статичну так і динамічну зміну температури.

3.3. Дослідження динамічних характеристик системи контролю розвитку мікротріщин у напружено – деформованих металічних конструкціях

Для підтвердження можливості вимірювання стрімкої зміни температури досліджено динамічні характеристики розробленої системи, оскільки, саме такі характеристики описують поведінку системи в інтервалі часу від моменту зміни вимірюваної величини до моменту, коли з цієї системи можливо зчитати встановлені покази.

Теоретично всі реальні динамічні системи є нелінійні і нестационарні, а їхні параметри розподілені. Практично більшість з них номінально можна вважати лінійними стаціонарними динамічними системами із зосередженими параметрами, за винятком тих, у яких нелінійність покладена в основу принципу дії.

Лінійна стаціонарна динамічна система із зосередженими параметрами описується звичайним динамічним рівнянням зі сталими коефіцієнтами [98]:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x, \quad (3.1)$$

яке в операторній формі матиме вигляд

$$(a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0) y(t) = (b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0) x(t), \quad (3.2)$$

де $p = d/dt$ - оператор диференціювання.

Диференціальне рівняння динамічної системи є вичерпною її характеристикою, але його коефіцієнти важко піддаються експериментальному визначенню. Тому як характеристики перетворення в часовій області використовується імпульсна перехідна функція та перехідна функція лінійної динамічної системи. Використовуючи інформацію, яку вони містять, можна знайти значення коефіцієнтів диференціального рівняння, які по-іншому важко ідентифікувати. З характеристиками перетворення в часовій області однозначно пов'язані характеристики перетворення в частотній області, що є наслідком дуальності часу і частоти.

В залежності від порядку диференційного рівняння, яке описує динаміку, засоби вимірювання та їх елементи поділяють на засоби першого другого чи вищого порядків.

Елементи розробленої системи є засобами та перетворювачами першого порядку, оскільки відношення їх вихідного сигналу до вхідного залежать від швидкостей зміни вхідного сигналу. Для таких елементів залежність між вихідним $Y(t)$ і вхідним $X(t)$ сигналом можна записати у вигляді [99]:

$$a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = b_1 \frac{dX(t)}{dt}, \quad (3.3)$$

де $\frac{dY(t)}{dt}$ - швидкість зміни вихідного сигналу;

a_1, a_0 і b_0 – константи.

Оскільки, зміна температури, яку необхідно контролювати розробленою системою, має стрибкоподібний характер, то зміна вихідного сигналу в часі може бути представлена у вигляді:

$$\frac{Y(t)}{X(t)} = \left(\frac{b_0}{a_0} \right) \left(1 - e^{-t/\tau} \right), \quad (3.4)$$

де $\tau = \frac{a_1}{a_0}$ - стала часу.

Перетворення Лапласа, що відповідає (3.3), можна зобразити у наступному вигляді:

$$a_1 p \cdot Y(p) + a_0 \cdot Y(p) = b_0 \cdot X(p). \quad (3.5)$$

Передавальну функцію, у загальному випадку, можна записати як

$$G(p) = \frac{b_0}{a_1 s + a_0}. \quad (3.6)$$

Передавальна функція системи складається з передавальних функцій елементів, що входять до складу даної системи. На рис. 3.15 зображено структурну схему системи для вимірювання зміни температури на поверхні металевих конструкцій з вказаними передавальними характеристиками елементів.



Рис. 3.15. Структурна схему системи для вимірювання зміни температури на поверхні металевих конструкцій.

Оскільки, чутливий елемент розробленої системи залито тонким шаром епоксидної смоли, необхідно врахувати цю передавальну функцію.

Передавальна функція епоксидного шару має вигляд:

$$G_e(p) = \frac{1}{1 + p\tau_e}, \quad (3.7)$$

де τ_e - стала часу шару епоксидної смоли.

Передавальна функція напівпровідникового давача визначається як

$$G_d(p) = \frac{1}{1 + p\tau_d}, \quad (3.8)$$

де τ_d - стала часу корпуса давача.

Передавальна характеристика підсилювача має вигляд:

$$G_n(p) = \frac{k \cdot \frac{1}{1+p\tau_n}}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot k \cdot \frac{1}{1+p\tau_n}}, \quad (3.9)$$

де k – коефіцієнт підсилення без петлі зворотного зв'язку;

τ_n - стала часу підсилювача.

До складу вимірювача входить два підсилювача G_{n1} та G_{n2} з аналогічними характеристиками.

Передавальну характеристику аналого-цифрового перетворювача можна зобразити у вигляді:

$$G_{АЦП}(p) = e^{-p\tau_s}, \quad (3.10)$$

де τ_s - час дискретизації АЦП.

Передавальну функцію системи можна описати як добуток передавальних функцій всіх складових елементів даної системи [100]

$$G(p) = G_e(p) \cdot G_d(p) \cdot G_n(p) \cdot G_n(p) \cdot G_{АЦП}(p), \quad (3.11)$$

тоді, загальний вигляд передавальної функції системи буде:

$$G(p) = \frac{1}{1+p\tau_e} \cdot \frac{1}{1+p\tau_d} \cdot \left(\frac{k \cdot \frac{1}{1+p\tau_n}}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot k \cdot \frac{1}{1+p\tau_n}} \right)^2 \cdot e^{-p\tau_s}, \quad (3.12)$$

Оскільки реакція розробленої системи на одиничне збурення, тобто стрибкоподібну зміну температури, визначається як $X(p) = \frac{1}{p}$, остаточно

$$Y(p) = X(p) \cdot G(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{1+p\tau_e} \cdot \frac{1}{1+p\tau_d} \cdot \left(\frac{k \cdot \frac{1}{1+p\tau_n}}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot k \cdot \frac{1}{1+p\tau_n}} \right)^2 \cdot e^{-p\tau_s}. \quad (3.13)$$

Постійні часу окремих елементів за літературними джерелами [88, 98 - 102] визначаються (в секундах): $\tau_e = 0,01$; $\tau_d = 0,005$; $\tau_n = 10^{-3}$; $\tau_s = 0,02$.

Здійснивши зворотнє перетворення Лапласа отримаємо залежність вихідної величини від часу при стрибкоподібному збуренні на вході розробленої системи [103]

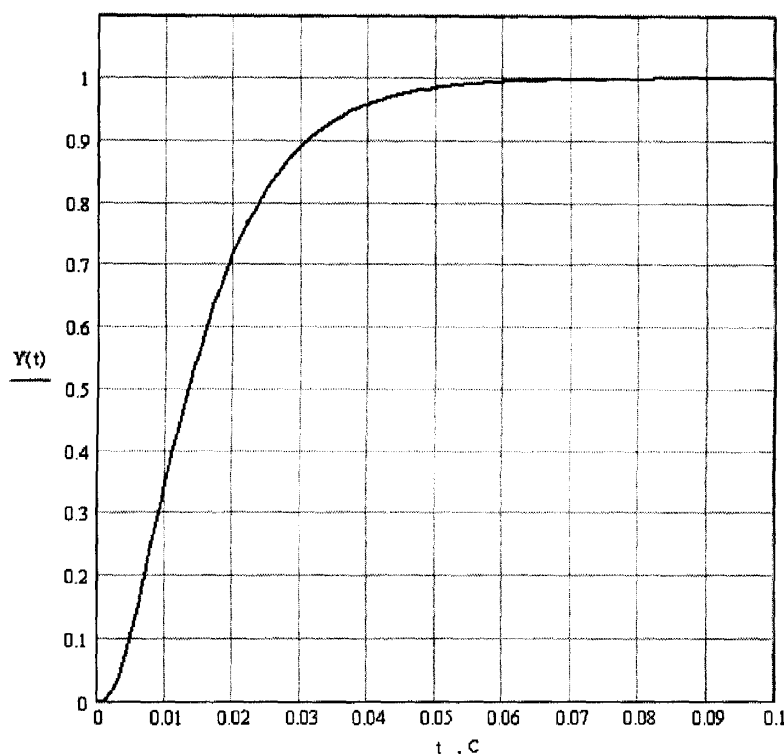


Рис.3.15. Залежність вихідної величини від часу при стрибкоподібному збуренні.

За допомогою ітераційного обчислення визначено час $t=0,058\text{с}$, протягом якого вихідна величина відтворює вхідну величину з похибкою, що не перевищує 1%.

Проаналізувавши динамічні характеристики системи для вимірювання зміни температури на поверхні металевих конструкцій, одержано передавальну функцію динамічної системи та залежність зміни вихідної величини від часу при стрибкоподібному вхідному збуренні, показано, що перехідний процес на виході системи носить аперіодичний характер.

Дані дослідження дозволяють стверджувати про можливість використання розробленої системи контролю стрибкоподібної зміни температури на поверхні металічної конструкції, що перебуває у напружено-деформованому стані, та проведення експериментальних досліджень з підтвердження одержаних результатів теоретичних досліджень.

Висновки до розділу 3

Розроблено систему контролю, яка дозволяє визначати зміну температури на поверхні металоконструкції у діапазоні від 0 до 60⁰С, має малу інерційність та може бути використана для проведення експериментальних досліджень з підтвердження одержаних теоретичних результатів.

Аналіз динамічних властивостей системи дозволяє зробити висновок про можливість контролю стрибкоподібної зміни температури на поверхні напружено-деформованої металічної конструкції тривалістю до 1 с.

РОЗДІЛ 4

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ РОЗВИТКУ МІКРОТРИЩИН У НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНИХ МЕТАЛІЧНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

У даній системі контроль розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях здійснюється шляхом вимірювання температури на поверхні об'єкта контролю, як інформативного параметра моменту зародження дефекту та прогнозування розвитку даного дефекту. Метрологічний аналіз системи повинен полягати у визначенні похибки засобу вимірювання температури на поверхні об'єкта контролю, та в аналізі вірогідності результатів проведення контролю зародження та поширення мікродефектів 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 нормованим значенням, що може бути задана у вигляді допуску, і виходячи з цього буде прийматися рішення про результати контролю [104].

Якщо співвідношенню з певним нормованим значенням передуює вимірювання параметра, то має місце вимірювальний контроль. У цьому випадку нормовані значення задаються у вигляді вставок. Під вставками, в такому випадку, будемо розуміти відображення допуску (градієнт розподілу температури в об'єкті контролю, при якому об'єкт здатний виконувати задані функції, зберігаючи при цьому свої експлуатаційні показники) в масштабі вихідної величини засобів вимірювання.

Основною причиною цього є наявність похибки вимірювання параметра, що контролюється.

Проаналізуємо похибку вимірювання зміни температури на поверхні об'єкта контролю розробленим засобом, і в першу чергу інструментальної похибки.

Серед існуючих методів визначення похибок засобів вимірювання (ЗВ) слід виділити аналітичні та експериментальні методи.

Оцінити загальну похибку використовуючи аналітичні методи через складність схемного рішення, яке базується на чисельних послідовних та паралельних з'єднаннях окремих елементів та блоків є досить складною задачею. Аналітичне вираження загальної похибки унеможливорює врахувати всі особливості застосування конструктивних рішень і є занадто громіздким [105]. Отже, слід застосувати експериментальний метод визначення метрологічних характеристик розробленої системи контролю.

4.1. Визначення метрологічних характеристик розробленої системи контролю

При визначенні загальної похибки системи контролю необхідно врахувати наступне:

- точність перетворення інформативного параметра у вимірювальний сигнал;
- оцінку зміни похибки вимірювання інформативного параметра від його величини.

4.1.1. Визначення точності перетворення інформативного параметра у вимірювальний сигнал.

Для вирішення цієї задачі слід врахувати діапазон зміни інформативного параметра, який становить від 0° до 60°C .

Метрологічний аналіз виконано для вимірювального каналу моделюванням первинного перетворювача температури: на вхід вимірювального каналу подавався сигнал від зразкового джерела напруги.

Отже, враховуючи діапазон вимірювання температури, структурну схему системи та особливості роботи аналогово-цифрового перетворювача при застосуванні системи контролю розвитку мікротріщин можна одержати m вибірок з обсягом вимірювань $n=1000$ для кожної точки діапазону.

Тоді кожне спостереження в одержаних вибірках можна позначити x_{ij} , де i - номер вибірки, $i=1, \dots, m$; j - номер елемента у виборці, $j=1, \dots, n$.

Можна записати, що кожна вибірка складається з елементів:

$$1-ша: x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n};$$

$$2-га: x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n};$$

.....

$$i-та: x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in};$$

.....

$$m-та: x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mn}$$

Кожен елемент у виборці вважаємо випадковою величиною. Найбільш повною характеристикою величини, а отже, і похибки, є її закон розподілу, за яким визначається характер появи різних результатів окремих вимірювань. Найпоширенішим законом розподілу випадкових величин є нормальний закон розподілу, який можна описати функцією розподілу [106]:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\Delta x^2 / 2 \cdot \sigma^2} dx, \quad (4.1)$$

де $f(x)$ - густина розподілу, графік якої називають нормальною кривою.

Для подальшої обробки одержаних результатів вимірювань необхідно перевіряти кожен вибірку на нормальність розподілу випадкових величин. Перевірку на нормальність розподілу проводили декількома методами [99]:

За критерієм χ^2 перевірка закону розподілу випадкових величин на нормальність здійснюється у наступному порядку: розділимо кожен вибірку X на l інтервалів $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_l$ і підрахуємо кількість результатів n_i , що попадають в кожний з інтервалів Δ_i . Оптимальна довжина інтервалу визначається за формулою [98]:

$$l = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{1 + 3,322 \lg n}. \quad (4.2)$$

Якщо вважати відомим теоретичний закон розподілу $F(x)$, можна визначити p_i – ймовірність попадання випадкової величини x в інтервал Δ_i . Тоді теоретичне число значень випадкової величини x , що попадає в інтервал Δ_i , можна визначити як $n \cdot p_i$.

Визначивши суму емпіричних частот: $m_1 + m_2 + \dots + m_i + \dots + m_l = n$ і суму ймовірностей p_i , можна оцінити закон розподілу випадкових величин. При $\sum_{i=1}^l p_i = 1$ і $n \rightarrow \infty$ випадкова величина x має нормальний закон розподілу.

За критерієм згоди Колмогорова – Смірнова необхідно зробити наступні операції та припущення [107].

Розташувати елементи у кожній вибірці в порядку зростання ознаки:

$$x_1, x_2, \dots, x_n;$$

$$x_i < x_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1,$$

де n - об'єм вибірки.

Побудувати емпіричну функцію розподілу таким чином:

$$F_x = \frac{i}{n}, \begin{cases} 0; & x < x_1; \\ x_i \leq x < x_{i+1}, & i = 1, 2, \dots, n-1; \\ 1, & x \geq x_n. \end{cases} \quad (4.3)$$

Сформулювати гіпотези:

$H_0: G(x) = F(x)$ – ознака X описується функцією розподілу $F(x)$;

$H_1: G(x) \neq F(x)$ – ознака X має іншу функцію розподілу;

α – рівень значущості.

Критерієм перевірки є величина d :

$$d = \max_x |F_x - F(x)|. \quad (4.4)$$

Величина d є модулем найбільшої різниці між емпіричною та теоретичною функціями розподілу для всіх значень ознаки X .

Величину d називають критерієм згоди Колмогорова – Смірнова.

Якщо $d < d^*$ (d^* - критичне значення критерію), то немає підстав відхиляти гіпотезу про нормальність закону розподілу.

Дані перевірок за двома критеріями оцінки закону розподілу результатів вимірювання у всіх вибірках свідчать про нормальність закону розподілу випадкових величин (табл. 4.1, 4.2, та в додатку Ж).

Таблиця 4.1

Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Колмогорова-Смірнова

| Температура, °С | Середнє арифм.знач. | СКВ | Критерій згоди d | Критичне значення критерію d* | Гіпотеза критерію d<d* |
|-----------------|---------------------|----------|------------------|-------------------------------|------------------------|
| 0 | 0,022818 | 0,060464 | 0,101448235 | 0,115258405 | Справджується |
| 10 | 10,0544 | 0,047643 | 0,099833577 | 0,115258405 | Справджується |
| 15 | 15,02751 | 0,042929 | 0,095098867 | 0,115258405 | Справджується |
| 20 | 20,07764 | 0,045857 | 0,100746588 | 0,115258405 | Справджується |
| 25 | 25,00531 | 0,035402 | 0,114715183 | 0,115258405 | Справджується |
| 30 | 30,05318 | 0,020986 | 0,098832327 | 0,115258405 | Справджується |
| 35 | 35,06678 | 0,015724 | 0,107780975 | 0,115258405 | Справджується |
| 40 | 40,06315 | 0,011529 | 0,060339191 | 0,115258405 | Справджується |
| 45 | 45,04863 | 0,010247 | 0,050511907 | 0,115258405 | Справджується |
| 50 | 50,02732 | 0,036109 | 0,082093547 | 0,115258405 | Справджується |
| 60 | 60,02705 | 0,053907 | 0,110289384 | 0,115258405 | Справджується |

Якщо відомо, що досліджувані випадкові величини розподілені за нормальним законом розподілу, то на наступному етапі визначення точності перетворення інформативного параметра у вимірювальний сигнал за одержаними вибірками необхідно оцінити математичне сподівання μ і середнє квадратичне відхилення σ по кожній з вибірок, оскільки саме ці параметри є найбільш повними числовими характеристиками випадкових величин при їх нормальному законі розподілу.

Оскільки випадкова величина x розподілена за нормальним законом з параметрами μ і σ^2 , то незміщена оцінка \bar{x} (середнє арифметичне) математичного сподівання μ має мінімальну дисперсію, рівну $\frac{\sigma^2}{n}$, тому середнє арифметичне \bar{x} в даному випадку є ефективною оцінкою математичного сподівання μ .

Таблиця 4.2

Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона (при температурі 20⁰С)

| k | X _{нижнє} | X _{верхнє} | X _c | Частота | m _i X _c | m _i (X _c -X _{сер}) ² | X | Φ((X-X _{сер})/s) | X _{нижнє} | X _{верхнє} | P | nPx | (n p _i - m _i) ² / n p _i |
|----|--------------------|---------------------|----------------|---------|-------------------------------|---|----------|----------------------------|--------------------|---------------------|-------------|----------|--|
| 1 | 19,99496 | 20,00896 | 20,00196 | 9 | 180,018 | 0,0515409 | 20,00896 | 0,012779727 | 19,99496 | 20,00896 | 0,0249529 | 24,9529 | 0,043939 |
| 2 | 20,00896 | 20,02296 | 20,01596 | 26 | 520,415 | 0,098897 | 20,02296 | 0,037732628 | 20,00896 | 20,02296 | 0,055282934 | 55,28293 | 1,374515 |
| 3 | 20,02296 | 20,03696 | 20,02996 | 64 | 1281,92 | 0,1454562 | 20,03696 | 0,093015562 | 20,02296 | 20,03696 | 0,099901072 | 99,90107 | 1,717518 |
| 4 | 20,03696 | 20,05096 | 20,04396 | 113 | 2264,97 | 0,1281229 | 20,05096 | 0,192916634 | 20,03696 | 20,05096 | 0,147258748 | 147,2587 | 3,996278 |
| 5 | 20,05096 | 20,06496 | 20,05796 | 123 | 2467,13 | 0,0475966 | 20,06496 | 0,340175382 | 20,05096 | 20,06496 | 0,177065205 | 177,0652 | 0,144898 |
| 6 | 20,06496 | 20,07896 | 20,07197 | 172 | 3452,38 | 0,0055304 | 20,07897 | 0,517240587 | 20,06497 | 20,07896 | 0,173673403 | 173,6734 | 0,163368 |
| 7 | 20,07896 | 20,09296 | 20,08597 | 179 | 3595,39 | 0,0124224 | 20,09297 | 0,69091399 | 20,07897 | 20,09296 | 0,138957225 | 138,9572 | 0,027568 |
| 8 | 20,09296 | 20,10696 | 20,09997 | 137 | 2753,7 | 0,0683219 | 20,10697 | 0,829871215 | 20,09297 | 20,10697 | 0,090691941 | 90,69194 | 1,952813 |
| 9 | 20,10696 | 20,12096 | 20,11397 | 104 | 2091,85 | 0,137286 | 20,12097 | 0,920563156 | 20,10697 | 20,12096 | 0,048281936 | 48,28194 | 0,223088 |
| 10 | 20,12096 | 20,13496 | 20,12797 | 45 | 905,759 | 0,1140062 | 20,13497 | 0,968845092 | 20,12097 | 20,13496 | 0,020965476 | 20,96548 | 0,419454 |
| 11 | 20,13497 | 20,14897 | 20,14197 | 18 | 362,555 | 0,0745009 | 20,14897 | 0,989810568 | 20,13497 | 20,14897 | 0,007425137 | 7,425137 | 0,892902 |
| 12 | 20,14897 | 20,16297 | 20,15597 | 10 | 201,56 | 0,0613647 | 20,16297 | 0,997235705 | 20,14897 | 20,16297 | 0,002764295 | 2,764295 | 2,764295 |

Сума

n 1000 20077,6 0,9450461

13,72064

Середнє 20,0776

Станд.відхилен

ня 0,030757

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i = 13,72063537$$

$$\chi^2^* = 16,91896016$$

Висновок: Так як $\chi^2 < \chi^2^*$ (χ^2^* - критичне значення критерію), то немає підстав запереувати нормальний розподіл випадкових величин

На рис.4.1. та додатку 3 зображено емпіричну функцію щільності розподілу результатів вимірювання температури [108].

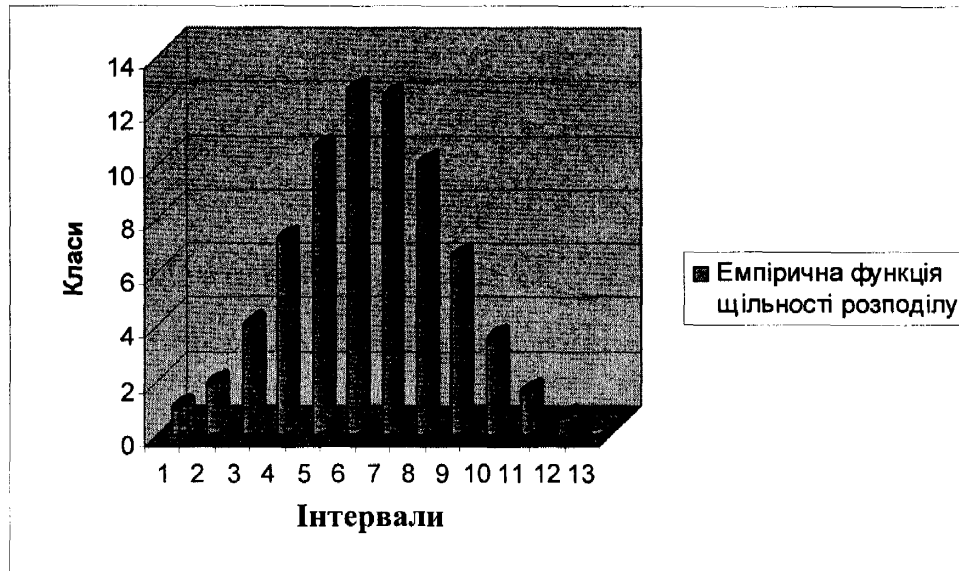


Рис.4.1. Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 20⁰С.

Середнє арифметичне значення результату спостережень в кожній вибірці можна визначити наступним чином :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i . \quad (4.5)$$

В свою чергу, математичне сподівання випадкової величини по кожній вибірці це [99]:

$$M[\bar{x}] = M\left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i\right] = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n M[x_i] = \frac{n \cdot M[x]}{n} = M[x]. \quad (4.6)$$

Так як середнє арифметичне значення результатів спостережень отримують в результаті сумування випадкових величин x_i/n і, відповідно, є також випадковою величиною, то воно має деяку дисперсію $D[\bar{x}]$, яку можна визначити за наступною формулою:

$$D[\bar{x}] = D\left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i\right] = \frac{1}{n^2} \cdot \sum_{i=1}^n D[x_i] = \frac{n \cdot D[x]}{n^2} = \frac{D[x]}{n}. \quad (4.7)$$

Залежність (4.7) має суттєве значення під час вимірювань, оскільки вона обґрунтовує можливість значного підвищення точності результату вимірювання багаторазового повторювання спостережень.

Дисперсія середнього арифметичного значення n спостережень у n разів менша від дисперсії одноразового спостереження. Звідси, можемо записати наступну характеристику нормального закону розподілу.

Середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного значення визначаємо наступним співвідношенням [107]:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (4.8)$$

Зі збільшенням числа спостережень середнє квадратичне відхилення $\sigma_{\bar{x}}$ наближується до нуля. А це, в свою чергу, означає, що середнє арифметичне значення результатів спостережень сходиться по ймовірності до математичного сподівання і є його визначальною оцінкою.

Для підтвердження того, що \bar{x} є ефективною оцінкою, розглянемо іншу незміщену оцінку \bar{x}' , яка є наступною лінійною функцією результатів спостережень:

$$\bar{x}' = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i, \quad (4.9)$$

де $\sum_{i=1}^n a_i = 1$.

Враховуючи це, побачимо, що серед всіх визначених таким чином оцінок середнє арифметичне значення має найменшу дисперсію.

Дисперсію оцінки \bar{x}' запишемо у наступному вигляді:

$$D[\bar{x}'] = D\left[\sum_{i=1}^n a_i x_i\right] = \sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot D[x_i] = D[x] \cdot \sum_{i=1}^n a_i^2. \quad (4.10)$$

Слід пам'ятати, що $\sum_{i=1}^n a_i^2$ досягає мінімуму у випадку, коли всі a_i однакові і дорівнюють $\frac{1}{n}$. Оцінка \bar{x}' , в такому випадку, стає середнім арифметичним \bar{x} :

$$\bar{x}' = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \cdot x_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}, \quad (4.11)$$

з дисперсією:

$$D[\bar{x}] = D[x] \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{n}\right)^2 = \frac{D[x]}{n}, \quad (4.12)$$

яка є меншою від дисперсії будь-якої іншої лінійної оцінки. Тому, \bar{x} є, також, ефективною оцінкою математичного сподівання випадкової величини.

Слід відзначити, що якщо результати окремих спостережень є досить розсіяними відносно середнього арифметичного, то розсіювання окремих середніх арифметичних є значно меншим і швидко зменшується внаслідок збільшення кількості спостережень.

Точковою оцінкою дисперсії випадкової похибки слід було б вибрати величину

$$\tilde{\sigma}_x^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (4.13)$$

Дана оцінка є ефективною і визначальною. Але вона є дещо зміщена, так як її математичне сподівання можна визначити наступним чином [109]:

$$M[\tilde{\sigma}_x^2] = \frac{n-1}{n} \cdot \sigma_x^2. \quad (4.14)$$

Отже, за точкову оцінку дисперсії випадкової похибки доцільно прийняти оцінку, яку описує наступна залежність:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (4.15)$$

Дисперсія σ_x^2 згідно (4.15) є незміщеною і носить назву емпіричної дисперсії.

За точкову оцінку середнього квадратичного відхилення результатів спостережень вибрано σ_x , що визначається за формулою:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (4.16)$$

Ця оцінка характеризує сходження окремих результатів спостережень, тобто степінь їх концентрації відносно середнього арифметичного значення результату вимірювань.

Тоді як σ - середнє квадратичне відхилення генеральної сукупності, то σ_x - середнє квадратичне відхилення результату спостережень.

Оскільки, середнє арифметичне результатів спостережень \bar{x} має дисперсію в n разів меншу від дисперсії випадкової похибки, то точковою оцінкою дисперсії середнього арифметичного є величина σ_x^2 , яку можна визначити наступним чином [110]:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \cdot \sigma_x^2 = \frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (4.17)$$

Точковою оцінкою середнього квадратичного відхилення середнього арифметичного є:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (4.18)$$

Значна кількість вимірювань n вказує на точність визначення $\sigma_{\bar{x}}$ і σ_x , а також близькість \bar{x} до дійсного значення вимірюваної величини.

4.1.2. Оцінка зміни похибки вимірювання інформативного параметра від його величини.

На наступному етапі дослідження метрологічних характеристик системи контролю слід оцінити зміну похибки вимірювання в залежності від зміни інформативного параметра.

Постає задача визначення форми зв'язку, тобто, виявлення механізмів отримання залежності випадкової змінної. Дану форму зв'язку можна охарактеризувати функцією регресії, що виражає математичне очікування змінної похибки, коли інформативний параметр приймає певне значення.

Функція регресії має важливе значення при статистичному аналізі залежності між змінними і може бути застосована для прогнозування однієї з випадкових змінних.

Якщо, по осі абсцис відкладаємо величину інформативного параметра і позначимо X , а по осі ординат – одержану похибку Y , то точність прогнозу Y буде визначатися дисперсією умовного розподілу:

$$\sigma^2(Y/X=x) = M[(Y/X=x) - M(Y/X=x)]^2, \quad (4.19)$$

або

$$\sigma^2(Y/X=x) = M(Y^2/X=x) - [M(Y/X=x)]^2, \quad (4.20)$$

тобто дисперсія визначається звичайним способом, однак, замість безумовного розподілу випадкової змінної беремо її умовний розподіл.

Для оцінки функції регресії необхідно знати аналітичний вигляд розподілу (X, Y) .

У нашому випадку характер залежності між змінними попередньо невідомий. Методика визначення цієї залежності полягає в наступному:

- на основі даних вибірок складаємо кореляційну таблицю;
- розраховуємо величину коефіцієнта кореляції r_{xy} згідно виразу [111]:

$$r_{xy} = \frac{C_{xy}}{S_x \cdot S_y}, \quad (4.21)$$

де $C_{xy} = \frac{\sum_1^n \left(x \cdot \sum_1^n n_{xy} y \right)}{n} - \bar{X} \cdot \bar{Y}$ - коваріація x та y ;

$\bar{X} = \frac{\sum_1^n n_x x}{n}$ - середнє арифметичне значення змінної x у вибірках;

$\bar{Y} = \frac{\sum_1^n n_x y}{n}$ - середнє арифметичне значення змінної y у вибірках;

n_x, n_y - частота значень x та y відповідно; n_{xy} - частота появи пари значень x та y ;

n - об'єм вибірки;

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_1^n n_x x^2}{n} - X^2};$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n n_y y^2}{n} - Y^2}.$$

- розраховуємо кореляційне відношення η_y :

$$\eta_y = \frac{S_{\bar{y}_x}}{S_y}, \quad (4.22)$$

де $S_{\bar{y}_x}$ - середнє квадратичне відхилення умовних середніх арифметичних значень \bar{y}_x від загального середнього Y .

$$S_{\bar{y}_x} = \sqrt{\frac{\sum n_x \cdot (\bar{y}_x - \bar{Y})^2}{n}},$$

або

$$S_{\bar{y}_x} = \sqrt{\frac{\sum n_x \cdot (\bar{y}_x)^2}{n} - (\bar{Y})^2},$$

$$\text{де } \bar{y}_x = \frac{\sum n_{xy} \cdot y}{n_x}.$$

Для спрощення процедури обрахунку застосовують метод "умовного нуля". Для цього знаходимо нові x' та y' згідно наступних виразів:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - a_x}{d_x}, \\ y' &= \frac{y - a_y}{d_y}, \end{aligned} \quad (4.23)$$

де a_x, a_y - значення середини інтервалів, яким відповідають найбільші частоти n_x, n_y ;

d_x, d_y - ширина інтервалів значень x та y відповідно.

Для обчислення застосовуємо наступні вирази:

$$\bar{X}' = \frac{\sum_1^n n_x x'}{n};$$

$$\bar{Y}' = \frac{\sum_1^n n_x y'}{n};$$

$$C'_{xy} = \frac{\sum_1^n \left(x' \cdot \sum_1^n n_{xy} y' \right)}{n} - \bar{X}' \cdot \bar{Y}';$$

$$S'_x = \sqrt{\frac{\sum_1^n n_x \cdot (x')^2}{n} - (\bar{X}')^2};$$

$$S'_{y_x} = \sqrt{\frac{\sum_1^n n_x \cdot (\bar{y}'_x)^2}{n} - (\bar{Y}')^2}.$$

Дійсні значення цих величин:

$$\bar{X} = a_x + d_x \cdot \bar{X}',$$

$$\bar{Y} = a_y + d_y \cdot \bar{Y}',$$

$$S_x = d_x \cdot S'_x,$$

$$S_y = d_y \cdot S'_{y_x},$$

$$C_{xy} = d_x \cdot d_y \cdot C'_{xy}$$

Тоді, за формулами (4.21) та (4.22) визначаємо значення коефіцієнта кореляції та кореляційне відношення.

- виходячи з одержаних значень r_{xy} , η_y і враховуючи таблицю 4.3 визначаємо характер зв'язку між змінними величинами.

Таблиця 4.3

Характеристика зв'язків в залежності від значень r_{xy} та η_y

| r_{xy} | η_y | Характеристика зв'язку |
|---------------------|--------------|------------------------------|
| $r_{xy} = \pm 1$ | - | Лінійний функціональний |
| $r_{xy} = 0$ | $\eta_y = 1$ | Криволінійний функціональний |
| $r_{xy} = 0$ | $\eta_y = 0$ | Відсутній |
| $r_{xy} = 0$ | $\eta_y < 1$ | Криволінійний кореляційний |
| $ r_{xy} = \eta_y$ | - | Точний лінійний кореляційний |
| $ r_{xy} > 0$ | $\eta_y < 1$ | Лінійний кореляційний |

Згідно розрахованих значень r_{xy} та η_y можна стверджувати про нелінійний функціональний зв'язок між нашими змінними.

За результатами розрахунків залежність між величиною інформативного параметра та похибкою його визначення можна описати поліноміальною функцією регресії (рис.4.2) з наступним рівнянням регресії:

$$\delta = -2E - 0,6t^3 + 0,0004t^2 - 0,0293t + 0,6093.$$

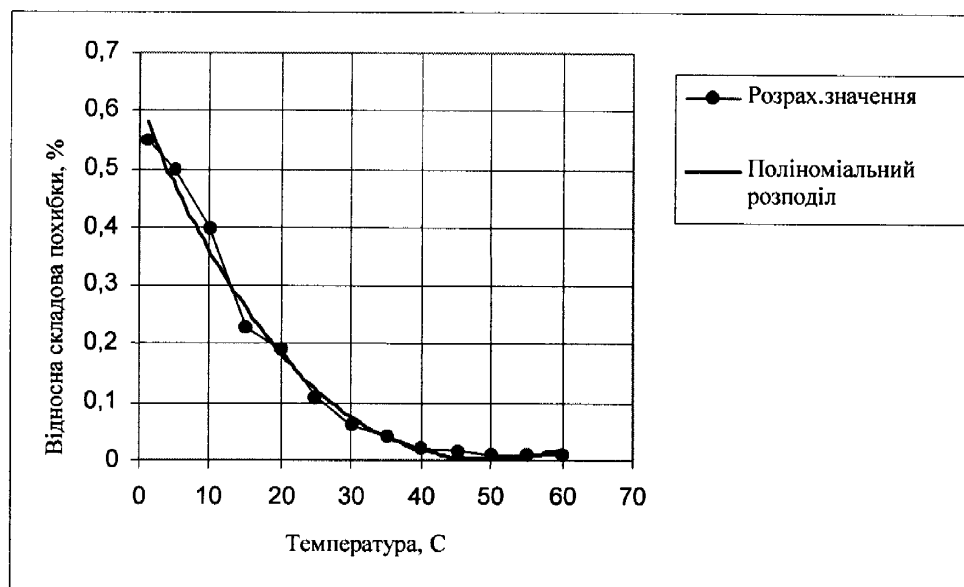


Рис.4.2. Залежність похибки визначення інформативного параметра від його величини.

4.2. Визначення основних показників контролю утворення мікрodefектів

Універсальним показником надійності є достовірність контролю.

Для оцінки достовірності контролю утворення мікрodefекту у напружено-деформованих конструкціях розробленою системою слід проаналізувати результати одержаних експериментальних досліджень на натурних зразках.

Позначимо загальну кількість зразків N ; N_0 - кількість зразків з зафіксованою за зміною температури на поверхні зразка мікротріщиною

(дефектні); N_6 - кількість зразків з незмінною структурою (не зафіксовано стрибкоподібне підвищення температури на поверхні зразка), (бездефектні).

Ймовірність виявлення дефекту P_0 , а ймовірність визнання зразка бездефектним P_6 :

$$\begin{aligned} P_0 &= N_0/N; \\ P_6 &= N_6/N = (N - N_0)/N; \\ P_0 + P_6 &= 1. \end{aligned} \quad (4.24)$$

Під час проведення контролю можуть виникнути наступні варіанти [104]:

1. Визначене число дефектних зразків приймемо N_{00} , а інша частина зразків N_{06} - бездефектні.

Ймовірність того, що під час контролю дефектні зразки будуть прийняті як дефектні - P_{00} , а як бездефектні - $P_{06} = 1 - P_{00}$.

Причому:

$$\begin{aligned} P_{00} &= N_{00}/N_0; \\ P_{06} &= N_{06}/N_0; \\ P_{00} + P_{06} &= 1. \end{aligned} \quad (4.25)$$

2. Визначене число бездефектних зразків буде N_{60} , а інша частина N_{66} - дефектні.

Ймовірність того, що під час контролю бездефектний зразок буде прийнято як бездефектний - P_{66} , а як дефектний - $P_{60} = 1 - P_{66}$.

Причому:

$$\begin{aligned} P_{60} &= N_{60}/N_6; \\ P_{66} &= N_{66}/N_6; \\ P_{60} + P_{66} &= 1. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Застосувавши теорему множення ймовірностей [107] запишемо наступні співвідношення:

$$\begin{aligned}
 P_{\delta\delta} &= P_{\delta} \cdot P_{\delta\delta} = P_{\delta} \cdot (1 - P_{\delta\delta}), \\
 P_{\delta\delta} &= P_{\delta} \cdot P_{\delta\delta} = P_{\delta} \cdot (1 - P_{\delta\delta}), \\
 P_{\delta\delta} &= P_{\delta} \cdot P_{\delta\delta} = (1 - P_{\delta}) \cdot P_{\delta\delta}, \\
 P_{\delta\delta} &= P_{\delta} \cdot P_{\delta\delta} = (1 - P_{\delta}) \cdot P_{\delta\delta}.
 \end{aligned}
 \tag{4.27}$$

де $P_{\delta\delta}, P_{\delta\delta}, P_{\delta\delta}, P_{\delta\delta}$ - ймовірності виявлення сумісних подій, відповідно: виявлення дефектного зразка, не виявлення дефектного зразка, виявлення бездефектного зразка, не виявлення бездефектного зразка.

На рис.4.3 показано формування характеристик достовірності контролю наявності дефектів у дослідних зразках.

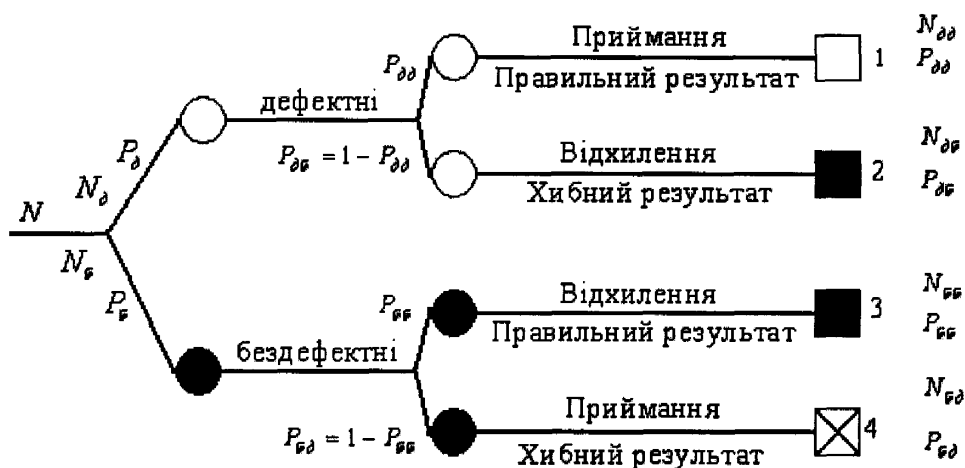


Рис.4.3. Формування характеристик достовірності контролю зародження мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях [104]:
1 - 4 – варіанти результатів контролю.

Ймовірність виявлення N_{δ} дефекту в зразку дорівнює P_{δ} ; ймовірність невиявлення N_{β} дефекту в зразку дорівнює P_{β} :

$$\begin{cases}
 P_{\delta} = P_{\delta\delta} + P_{\delta\delta} = P_{\delta} \cdot (1 - P_{\delta\delta}) + (1 - P_{\delta}) \cdot P_{\delta\delta} \\
 P_{\beta} = P_{\beta\beta} + P_{\beta\delta} = P_{\beta} \cdot (1 - P_{\beta\beta}) + (1 - P_{\beta}) \cdot P_{\beta\delta}
 \end{cases}
 \tag{4.28}$$

З даного співвідношення визначають характеристики правильних висновків.

$$P_{\delta} + P_{\beta} = P_{\delta} \cdot P_{\delta\delta} + P_{\beta} \cdot P_{\beta\beta} + P_{\delta} \cdot P_{\delta\delta} + P_{\beta} \cdot P_{\beta\delta} = 1.$$

Звідси, ймовірність правильного визначення

$$D = P_{\delta} \cdot P_{\delta\delta} + P_{\beta} \cdot P_{\beta\beta} = P_{\delta\delta} \cdot P_{\beta\beta},$$

а помилкового визначення

$$D_n = P_\delta \cdot P_{\delta\delta} + P_\delta \cdot P_{\delta\delta} = P_{\delta\delta} \cdot P_{\delta\delta},$$

$$D_n = 1 - D.$$

Для оцінки достовірності відповідності зразків встановленим вимогам доцільно застосовувати співвідношення

$$P_{вих} = \frac{N_\delta}{N_\epsilon},$$

де $N_\delta = N \cdot P_\delta \cdot (1 - P_{\delta\delta})$;

$$N_\epsilon = N \cdot P_\delta \cdot (1 - P_{\delta\delta}) + N \cdot (1 - P_\delta) \cdot P_{\delta\delta}.$$

Тоді

$$P_{вих} = \frac{P_\delta \cdot (1 - P_{\delta\delta})}{P_\delta \cdot (1 - P_{\delta\delta}) + (1 - P_\delta) \cdot P_{\delta\delta}}. \quad (4.29)$$

Для визначення властивостей $P_{вих}$ застосовують вираз (4.29) перетворений наступним чином:

$$P_{вих} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{P_\delta} - 1\right) \cdot \left[\frac{P_{\delta\delta}}{(1 - P_{\delta\delta})}\right]}, \quad (4.30)$$

$$P_{вих} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{0,75} - 1\right) \cdot \left[\frac{0,15}{(1 - 0,1)}\right]} = 0,9473.$$

Враховуючи одержані результати отримаємо, що розроблена система контролю розвитку мікротріщин у напружено – деформованих конструкціях дозволяє контролювати момент зародження та розвиток мікротріщин з ймовірністю $P_{вих} = 0,9473 \approx 0,95$.

Висновки до розділу 4

Виходячи із проведеного аналізу застосованих схемотехнічних рішень розробленої системи контролю впливає доцільність проведення експериментальних досліджень метрологічних характеристик розробленого засобу.

За результатами експериментальних досліджень доведено, що похибка вимірювання температури розробленою системою контролю не перевищує 0,7%.

Аналізуючи залежність зміни похибки від величини інформативного параметра, можна стверджувати, що в діапазоні вимірювання від 20° до 60°C має нелінійний характер і описується наступним рівнянням регресії $\delta = -2E - 0,6t^3 + 0,0004t^2 - 0,0293t + 0,6093$.

За результатами контролю можна стверджувати, що розроблена система контролю дозволяє контролювати утворення мікротріщини, за зміною температури на поверхні об'єкта контролю, з ймовірністю 0,95.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ РОЗВИТКУ МІКРОТРІЩИН НА РЕАЛЬНИХ ЗРАЗКАХ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Як показано вище, більшість існуючих методів неруйнівного контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях орієнтовані на дефектоскопічні критерії оцінки стану металу, а процеси зародження, розвитку та накопичення структурних змін ні виявляти, ні вимірювати їх кількісно, не руйнуючи при цьому сам об'єкт контролю, практично, неможливо.

Запропоновано спосіб використання стрибкоподібної зміни температури на поверхні об'єкту контролю, як інформативного параметру, що вказує на момент зародження мікрodefекту типу мікротріщини у металах, які знаходяться у напружено - деформованому стані [112].

Для підтвердження можливості використання зміни температури, як інформативного параметру для контролю зародження мікротріщини було проведено ряд експериментальних досліджень.

Експериментальне дослідження динамічних характеристик системи проведено в лабораторних умовах шляхом створення періодичної зміни температури, яка контролюється системою.

Для визначення зміни температури на поверхні об'єкта контролю використано метод випробування на статичний розтяг зразків.

Для проведення експериментальних досліджень було виготовлено зразки з наперед сформованими зонами концентраторів напружень.

5.1. Лабораторні дослідження динамічних характеристик системи контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях

У процесі проведення лабораторних досліджень було змодельовано періодичну зміну температури поверхні з певною частотою шляхом торкання давача до поверхні нагрітого металу (до 50°C) на короткий проміжок часу. Частота такого торкання (вручну) змінювалась від 2 до 4 торкань на секунду. Температура поверхні контролювалась термоелектричним перетворювачем типу КТХК (виробництво НВФ «КонтрАвт», Росія).

Графіки зміни температури для різних частот подані на рис.5.1. та рис.5.2.

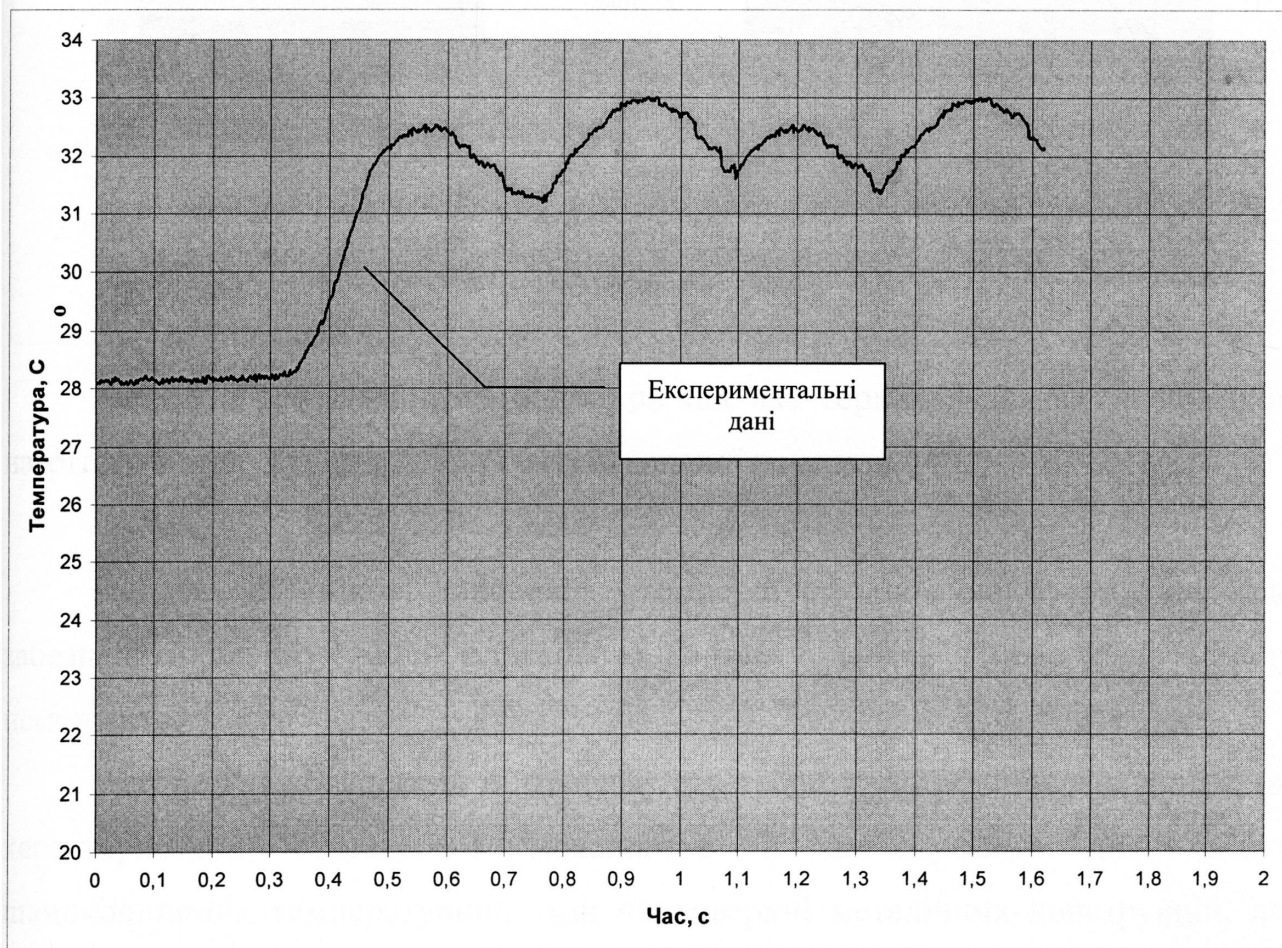


Рис.5.1. Графік зміни температури під час торкання давача до поверхні нагрітого металу (температура контрольованої поверхні 33°C).

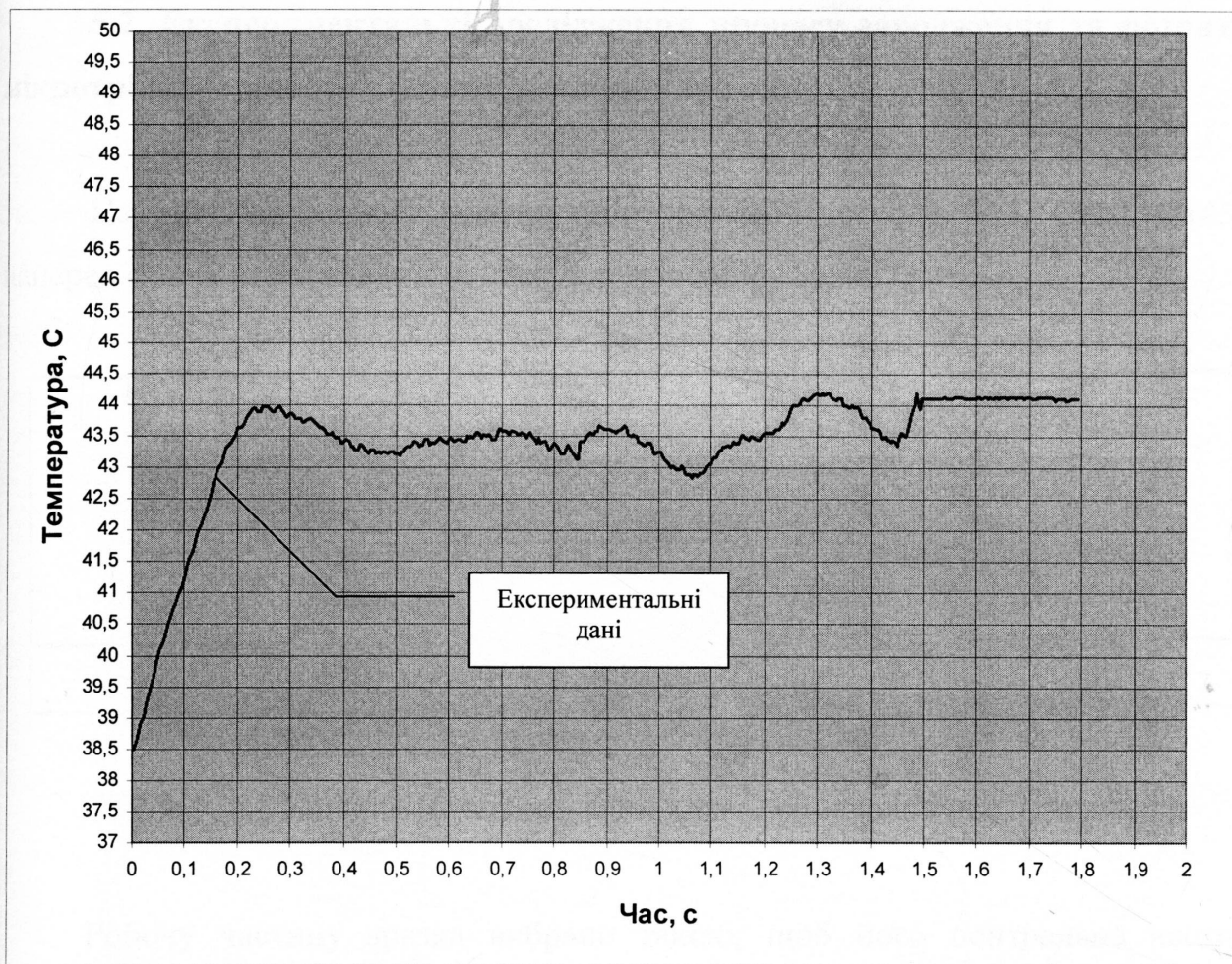


Рис.5.2. Графік зміни температури під час торкання давача до поверхні нагрітого металу (температура контрольованої поверхні 44°C).

Неоднакові пікові значення температури пояснюються тим, що забезпечити вручну умови однакового контакту давача з поверхнею металу неможливо.

Результати досліджень підтверджують теоретично встановлені динамічні характеристики системи і можливість її застосування для оцінки швидкоплинних температурних змін на поверхні металічних конструкцій, які виникають при зародженні і розвитку мікротріщин в тілі таких конструкцій.

5.2. Експериментальні дослідження процесу зародження та розвитку мікротріщин з використанням реальних зразків

На рис. 5.3 подано конструкцію зразків зі сталей Ст3, Ст20, Ст45 з наперед створеними зонами концентраторів напружень.

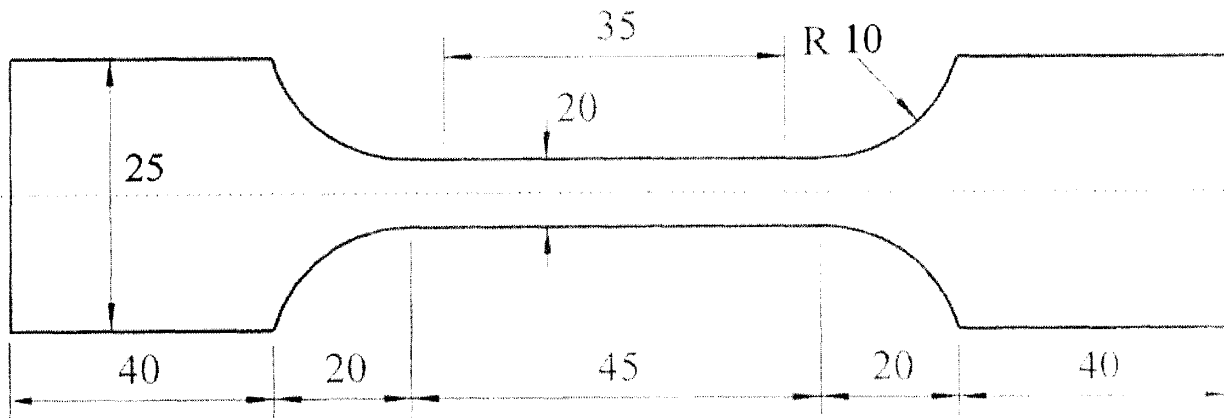


Рис.5.3. Експериментальний зразок для проведення досліджень.

Робочу частину зразка вибрано 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 [113].

Зразки вирізалися з листових конструкційних сталей (Ст 3, Ст 20, Ст 45) товщиною 8 мм, які попередньо не знаходились під дією навантажень [114]. Середня частина зразків проходила механічну обробку на фрезерному та шліфувальному верстатах. 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.

Навантаження на статичний розтяг зразків було створено розривною машиною типу УММ-50, що представляє собою контрольно-вимірвальний пристрій для задавання статичних навантажень при розтягу, стиску, згині та загині, з точністю встановлення навантаження 1%.

Схема проведення експериментальних досліджень напружено-деформованого стану зразків в лабораторних умовах за допомогою розробленого технічного засобу контролю зображено на рис.5.4.



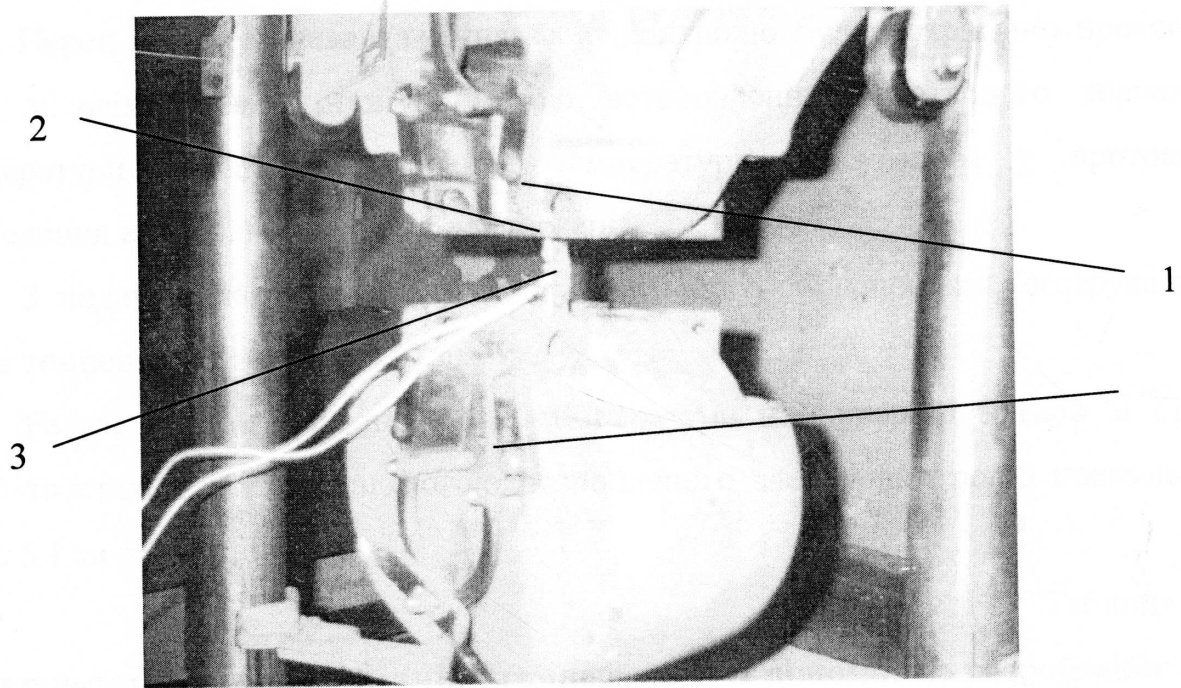
Рис.5.4. Схема проведення експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження проводились при температурі оточуючого середовища 15°C , та відносній вологості 80%.

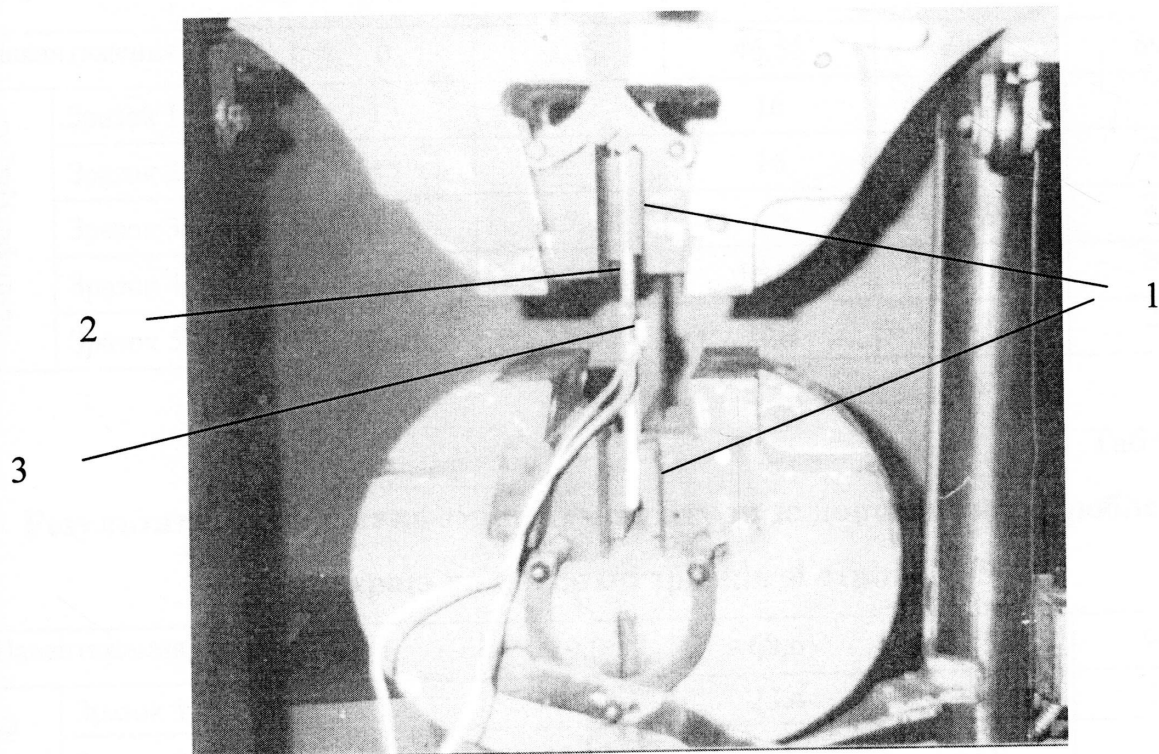
Перед проведенням експериментальних досліджень зразки знаходились в даних умовах протягом 8 годин.

Підготовку дослідної машини УММ-50 до вимірювань проведено у відповідності з технічним описом та інструкцією з експлуатації [115].

Експериментальний зразок був встановлений у тримачі розривної машини згідно схеми (рис.5.4), а чутливий елемент розробленого засобу закріплювався у зоні ймовірного утворення дефекту (рис.5.5 а, б).



а)



б)

Рис.5.5. Положення чутливого елемента вимірювача температури під час проведення експериментальних досліджень:

- 1 – тримачі розривної машини УММ-50;
- 2 – об'єкт контролю;
- 3 – чутливий елемент вимірювача температури.

Перед подачею навантаження засіб контролю було витримано протягом 5 хв. у ввімкненому стані з метою встановлення початкового значення температури. Початкове значення температури фіксувалося у протоколі проведення експериментальних досліджень.

З подачею навантаження і поступовим його збільшенням реєструвалась зміна температури на поверхні зразка.

Результати вимірювань зміни температури на поверхні зразків зі сталі Ст20 та сталі Ст45 за допомогою розробленого засобу контролю показано у табл. 5.1 та 5.2 відповідно.

Таблиця 5.1

Результати вимірювань зміни температури за допомогою розробленого пристрою на поверхні зразків зі сталі Ст20

| Навантаження, Р, кН | | 0 | 7,35 | 46,55 | 68,6 | 69,58 |
|---------------------|----------|-------|------|-------|------|-------|
| Температура, °С | Зразок 1 | 15 | 15,2 | 16 | 24,5 | 25 |
| | Зразок 2 | 15 | 15,1 | 16 | 24 | 24,8 |
| | Зразок 3 | 15 | 15,3 | 16 | 23,9 | 25,1 |
| | Зразок 4 | 15 | 15,6 | 16,07 | 24,7 | 24,6 |
| | Зразок 5 | 15,01 | 15,2 | 15,7 | 24,8 | 25,6 |

Таблиця 5.2

Результати вимірювань зміни температури за допомогою розробленого пристрою на поверхні зразків зі сталі Ст45

| Навантаження, Р, кН | | 0 | 19,6 | 68,6 | 80,36 | 90,16 |
|---------------------|----------|-------|-------|------|-------|-------|
| Температура, °С | Зразок 1 | 15 | 15,2 | 23,4 | 25,4 | 25,8 |
| | Зразок 2 | 15,01 | 15,12 | 23 | 25,6 | 26 |
| | Зразок 3 | 15,04 | 15,21 | 23,1 | 25 | 27 |
| | Зразок 4 | 15 | 15,15 | 23,5 | 25,3 | 26,3 |
| | Зразок 5 | 15 | 15,13 | 23,4 | 25,5 | 27,4 |

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

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

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

де t – температура на поверхні зразка, P – прикладене навантаження (рис. 5.6 та рис.5.7).

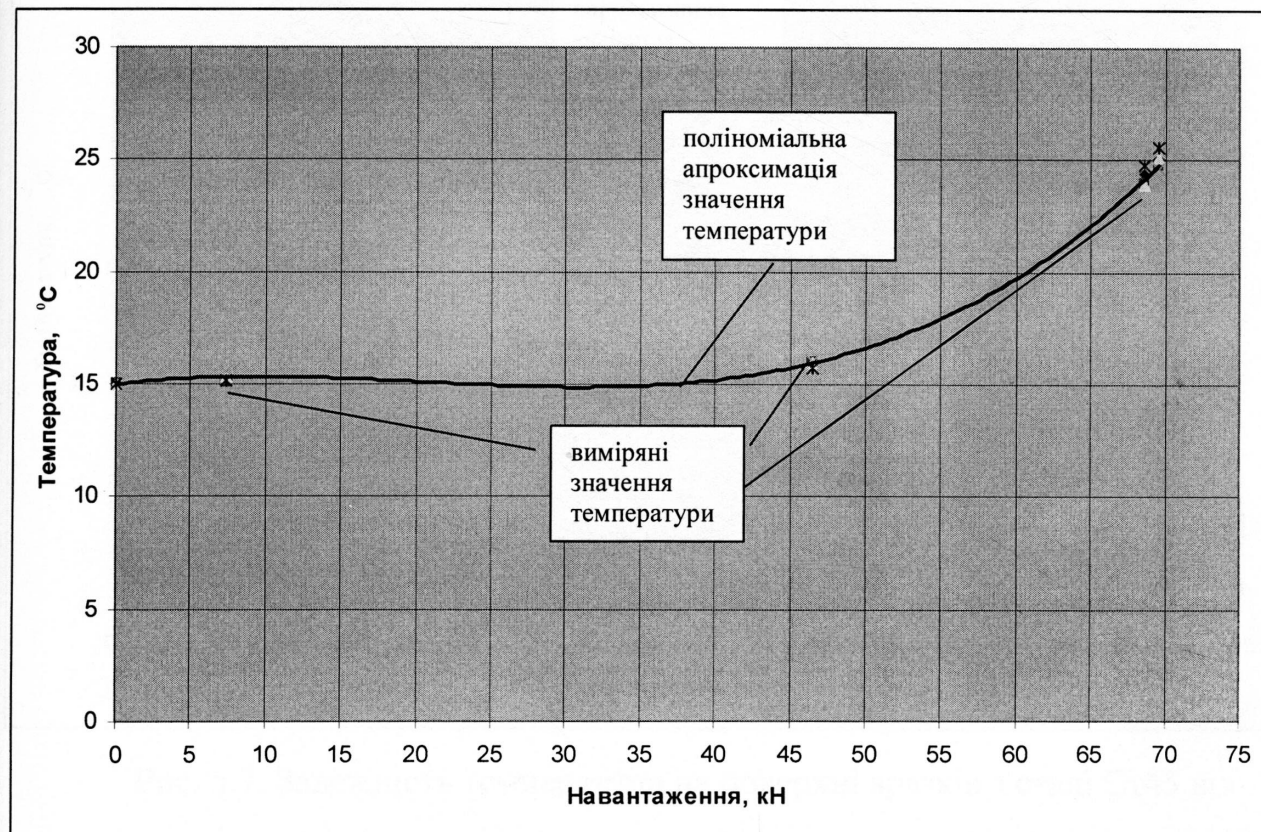


Рис. 5.6. Залежність температури на поверхні зразків з сталі Ст20 від прикладеного навантаження.

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.

Оцінка вірогідності отриманих результатів здійснена шляхом паралельного вимірювання температури поверхні зразків термоелектричними перетворювачами типу КТХК (виробництво НВФ «КонтрАвт», Росія). Розбіжність результатів можна пояснити значною різницею динамічних характеристик засобів.

Отримане співпадіння результатів в межах 5% дозволяє зробити висновок про можливість використання розробленої системи для контролю температури поверхні зразків в статичному режимі.

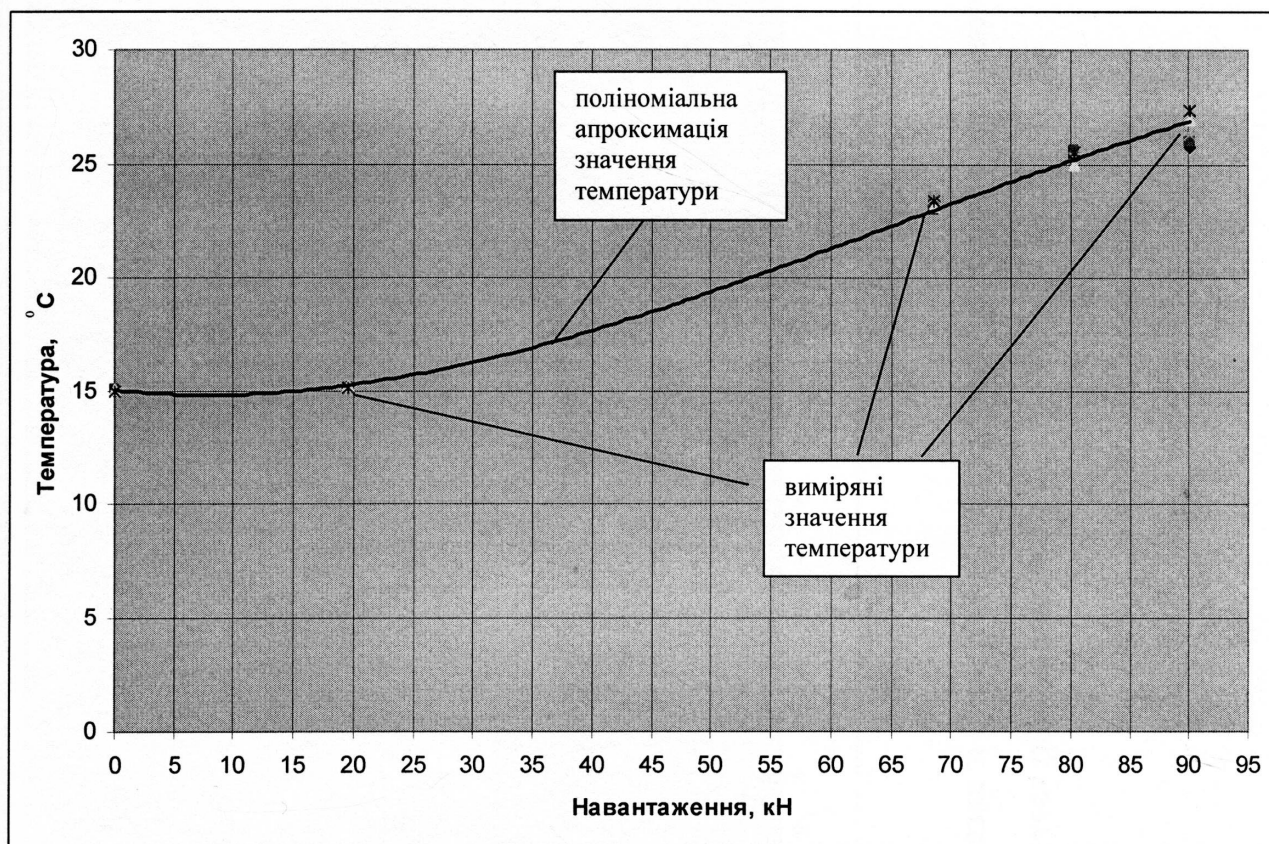


Рис. 5.7. Залежність температури на поверхні зразків з сталі Ст45 від прикладеного навантаження.

Наступним етапом експериментальних досліджень було виявлення стрибкоподібної зміни температури на поверхні напружено-деформованого металічного зразка під час зародження мікротріщин. Для цього реєструвалась зміна температури в часі (рис.5.8).

Після виявлення стрибкоподібної зміни температури (рис.5.8) подача навантаження припинялась і дослідні зразки перевірялись на наявність несутільностей рентгенівським та акустичним методами контролю.

Всього було досліджено 30 зразків (по 10 шт. зі сталей Ст3, Ст20, Ст45).

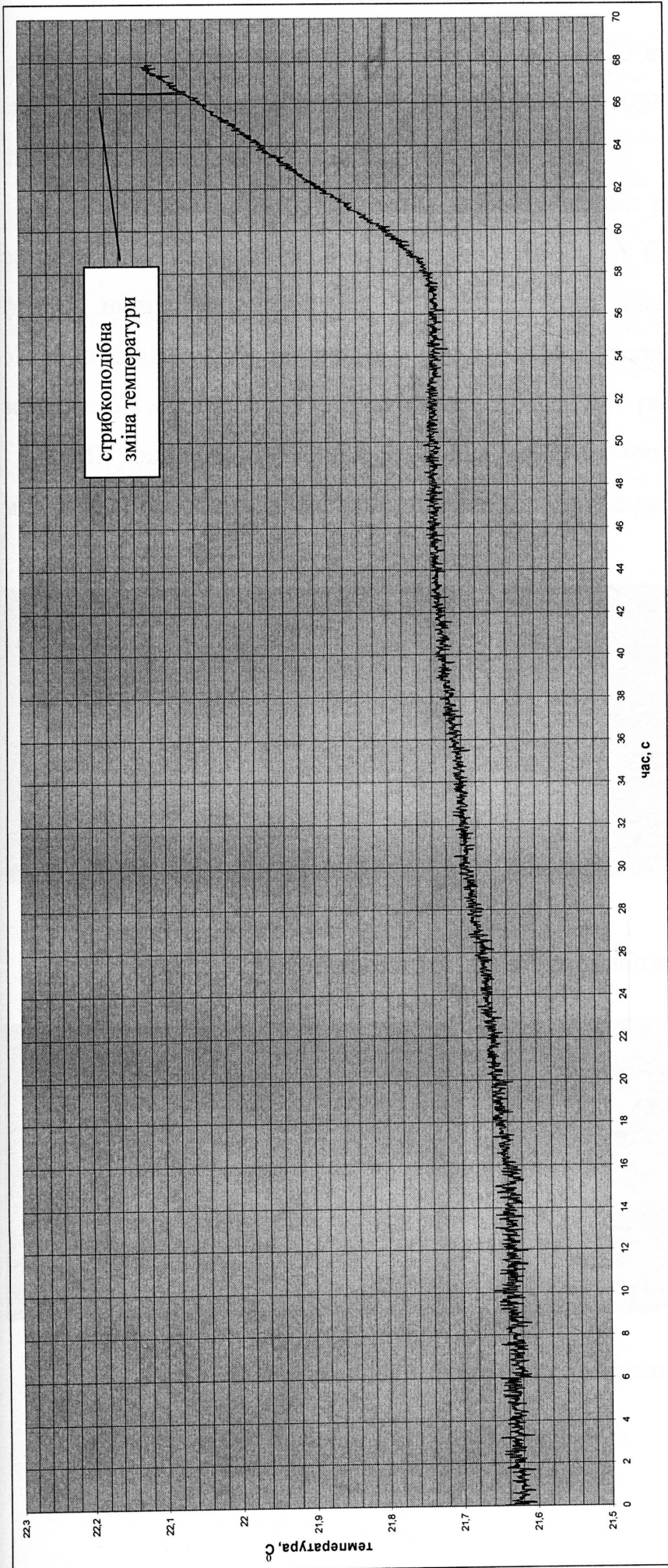


Рис.5.8. Залежність температури на поверхні зразка зі сталі Ст3 від часу, протягом якого навантаження збільшується рівномірно.

Проаналізувавши відрізок часу від 50 до 70 с визначено, що тривалість стрибкоподібної 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.Лашкарьова Національної академії наук України (Додаток И). На рис. 5.9 та 5.10, 5.11, і в додатку К наведено збільшені зображення мікрошліфів (збільшення від 50 до 640 разів).

Мікрошліфи підтверджують, що момент зародження і процес розвитку мікротріщини мають фрактальний характер, що не заперечує викладене вище.

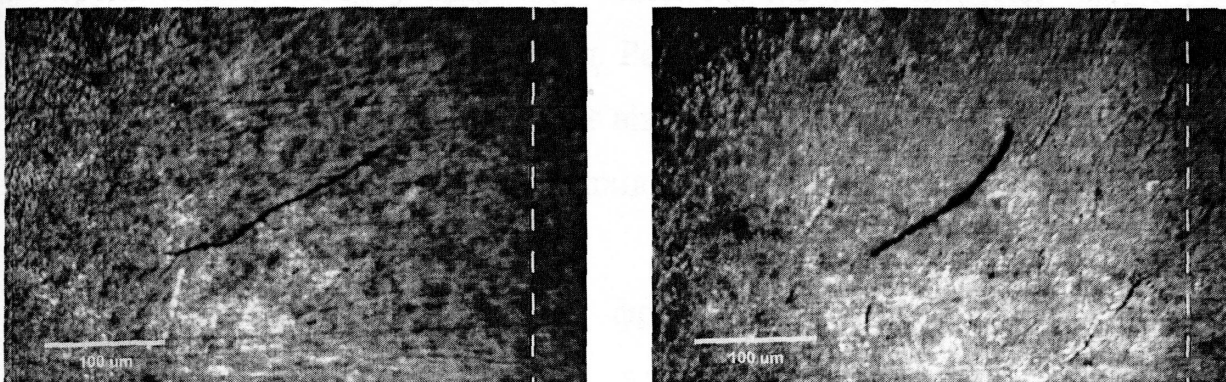


Рис.5.9. Мікрошліфи зразків виготовлених зі сталі Ст20.

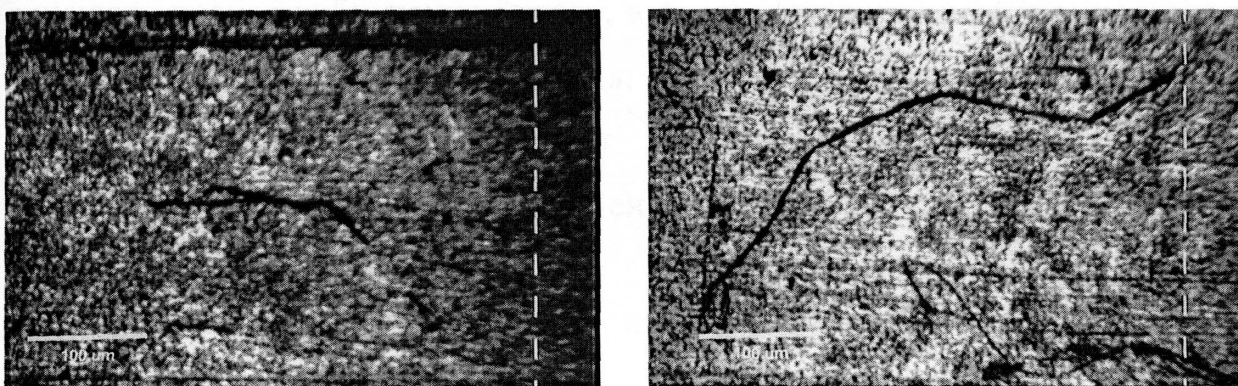


Рис.5.10. Мікрошліфи зразків виготовлених зі сталі Ст45.

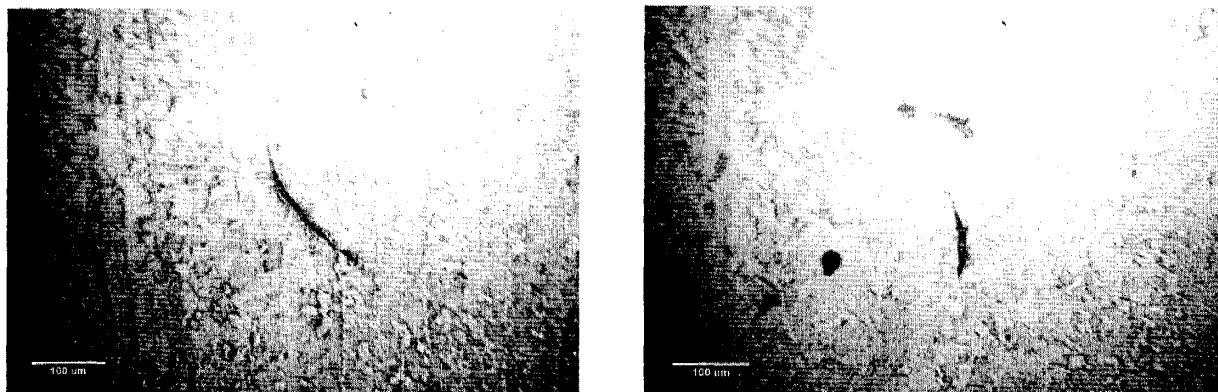


Рис.5.11. Мікрошліфи зразків виготовлених зі сталі Ст3.

Розроблена система дозволяє, також, оцінити розвиток мікротріщини в макротріщину аж до її виходу на поверхню зразка, але здійснити безпосередній контроль такого процесу видається занадто складною задачею, тому в роботі використано опосередкований підхід. Розроблена математична модель процесу та програмна реалізація, яка дозволяє візуалізувати процес розвитку тріщини. В основу моделі покладено відомий підхід [45] за яким розвиток мікротріщин має фрактальний характер.

Це дозволило застосувати фрактальну механіку руйнувань для знаходження універсального взаємозв'язку між мікро- та макрохарактеристиками металів під час переходу системи через точку біфуркації. А також, дозволило визначити критичні 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.

5.3. Визначення параметрів, що описують процес руйнування металу, з застосуванням фрактальної механіки руйнувань

До таких параметрів відносимо наступні:

- кількість енергії, що необхідна для самоподібного росту мікротріщини.

- коефіцієнт масштабу, що визначає тривалість росту мікротріщини;
- максимальний розмір автомодельності зони передруйнування;
- критичний розмір мікротріщини, що має властивість до самоподібного поширення;
- фрактальну розмірність дисипативної структури.

5.3.1. Знаходження кількості енергії, що необхідна для самоподібного росту мікротріщини.

На основі гіпотези структурно - енергетичної аналогії плавлення і руйнування [7] розвинута модель руйнування, яка враховує нерівноважні фазові переходи в зонах передруйнування металу, що деформується. В основу моделі покладено наступне:

- локалізовані зони з граничною деформацією характеризуються станом, при якому дисипація підведеної енергії є неможливою ні під час пластичної деформації, ані в результаті утворення нових поверхонь поділу;

- під час досягнення граничної деформації виникають нерівноважні фазові переходи кристалічної фази в квазіаморфну, а з квазіаморфної у деструктивну;

- дисипація енергії під час процесу нерівноважних фазових переходів в зоні локальної деформації залишається зрівноваженою до того часу, поки розподіл несущальностей в деструктивній фазі не стане критичним;

- при досягненні нерівноважності деструктивної фази процес руйнування набуває автомодельного характеру, так як поширення мікротріщини відбувається з вивільненням енергії пружної деформації і не залежить від зовнішніх умов.

Проаналізуємо поведінку зони біля концентратора напружень або мікротріщини. Енергія, що поглинається металом під час деформації, витрачається на дилатацію (зміну об'єму) та дисторсію (зміну форми).

Густина енергії деформації змінюється від одного об'єму до іншого, а її розподіл починається під час досягнення критичної густини енергії одного і

того ж рівня ($dW/dV = W_c = const$), при цьому мікроелементи вздовж шляху руху макротріщини піддаються макродилатації та макродисторсії. Це забезпечує зародження мікротріщин попереду макротріщини вздовж площини розтягуючих напружень. Мікроелементи суміжних об'ємів піддаються макродилатації та макродисторсії. Таким чином забезпечується умова для періодичного зародження мікротріщин [116].

Отже, взаємодія між дисторсією і дилатацією є складовою частиною поведінки металу, що перебуває під дією навантаження. Дилатаційні ефекти домінують вздовж шляху макротріщини, а дисторсійні ефекти супроводжують макродеформації. Критична дисторсія пов'язана з нестійкістю трансляційного типу, а дилатаційна є нестійкістю ротаційного типу.

Перша реалізується при досягненні в площині ковзання критичного напруження мікрозсуву τ_c .

Критичну густину енергії W_{dc} можна виразити через τ_c у вигляді:

$$W_{dc} = \tau_c^2 / 2 \cdot G, \quad (5.1)$$

де G – модуль зсуву.

Ротаційна нестійкість в локальному об'ємі металу реалізується при критичному напруженні σ_c , так, що критичну густину енергії, що контролює границю зміни форми (дилатацію), можна зобразити у вигляді [42]:

$$W_{vc} = \sigma_c^2 / 2 \cdot E. \quad (5.2)$$

Якщо провести розподіл максимальної густини енергії деформації під час руйнування на дві складові: одна з яких пов'язана зі зміною форми, а інша – тільки зі зміною об'єму, то критичне напруження у виразі (5.2) є максимальним напруженням.

Розділивши (5.1) на (5.2) отримаємо [117]

$$\tau_c / \sigma_c = \left[\left(W_{dc} / W_{vc} \right) \cdot \left(G / E \right) \right]^{1/2}. \quad (5.3)$$

Так як густина енергії для критичної дилатації W_{vc} дорівнює H_{TS} , а для критичної дисторсії W_{dc} дорівнює L_m , то з врахуванням (5.3), отримаємо:

$$\tau_c / \sigma_c = \left[\left(L_m / H_{TS} \right) \cdot (G/E) \right]^{1/2}. \quad (5.4)$$

Позначивши вираз у квадратних дужках $\left(L_m / H_{TS} \right)$ як Δ , отримаємо

$$\left(W_{dc} / W_{vc} \right) = \left(\Delta \cdot E / G \right), \quad (5.5)$$

де Δ - стала руйнування:

$$\begin{aligned} \Delta &= \left(W_{dc} / W_{vc} \right) (G/E), \\ \Delta &= \left(L_m / H_{TS} \right) \cdot (G/E), \\ \Delta &= \left(\tau_c / \sigma_c \right)^2. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Отже, враховуючи (5.5), відношення W_d / W_v , при досягненні якого відношення τ_c / σ_c в локальному об'ємі досягає критичного значення, можна виразити за допомогою співвідношення [117]:

$$W_d / W_v = W_{dc} / W_{vc} = 2 \cdot \Delta \cdot (1 + \nu), \quad (5.7)$$

де $\nu = E / 2 \cdot G^{-1}$.

Отже, критерієм стійкості кристалічної фази є реалізація умови $W_d / W_v \leq W_{dc} / W_{vc}$.

Під час фазового переходу кристалічної фази в квазіаморфну коефіцієнт Пуасона ν спонтанно змінюється до максимального значення $\nu = \nu_{\max}$. Під час переходу квазіаморфної фази в деструктивну ν знижується і нестійкість кластера, що містить деструктивну фазу, відповідає $\nu = \nu_{\min}$.

Умову стійкості кластера, що містить квазіаморфну фазу можна записати у вигляді:

$$W_d / W_v \leq \Delta^m \cdot 2 \cdot (1 + \nu), \quad (5.8)$$

де m – характеризує послідовність переходу системи в нестійкий стан ($m = 1, 2, 3, \dots, \infty$).

При $m = \infty$ отримаємо кількість енергії, що необхідна для самоподібного росту мікротріщини:

$$\frac{W_d}{W_v} = \left(\frac{W_d}{W_v} \right)_{\max} = 2 \cdot (1 + \nu). \quad (5.9)$$

5.3.2. Знаходження коефіцієнту масштабу, що визначає тривалість росту мікротріщини, яка здатна самоподібно поширюватись.

Коефіцієнт масштабу є параметром, який служить для переходу від руйнування на мікрорівні до руйнування на макрорівні.

Для його знаходження розглянемо енергетичний стан локального об'єму металу попереду тріщини під час її поширення. Під час субкритичного росту тріщини відношення густини енергії деформації S_j до відстані r_{0j} від краю тріщини елемента з критичною густиною енергії деформації W_c залишається постійним [9].

В умовах плоскої деформації коефіцієнт густини енергії деформації пов'язаний з коефіцієнтом інтенсивності напружень K_I співвідношенням:

$$S_j = K_I^2 \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - \nu) / (2 \cdot \pi \cdot E). \quad (5.10)$$

З іншого боку, енергія на одиницю довжини тріщини G_I і W_c пов'язані співвідношенням [118]:

$$G_I = W_c \cdot L_{0j}, \quad (5.11)$$

де L_{0j} - розмір зони з густиною енергії W_c в перпендикулярному напрямку до руху тріщини.

Для точки переходу до нестабільного руйнування, що характеризується $C_I = C_{IC}$ та $L_{0j} = L_{0C}$, можна записати вираз:

$$r_{0c} / L_{0C} = \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - \nu)}{2 \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2)}. \quad (5.12)$$

Якщо розглядати точку біфуркації, що відповідає пружньопластичному переходу під час руху тріщини, враховуючи $r_{oj} = r_{oc}$ при $K_I = K_{Ic}^\phi$, то критичне значення i_r^c можна представити у вигляді [42]:

$$(i_r^c)_{\max} = \left[\frac{E \cdot (K_{IR}^{\max})^2}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \right] \cdot \left[\frac{W_{c^*}}{(K_{Ic}^\phi \cdot \sigma_T)^2} \right], \quad (5.13)$$

де K_{Ic}^ϕ - критичний коефіцієнт інтенсивності напружень у точці біфуркації, що відповідає або руйнуванню або пластичній нестабільності;

σ_T - опір пластичній деформації;

W_{c^*} - критична густина енергії деформації, яка дозволяє контролювати механічні властивості на макрорівні у квазіаморфній фазі;

K_{IR}^{\max} - розмірна стала, що контролює максимальний розмір автотельності зони передруйнування.

В даному співвідношенні комплекс

$$\frac{W_{c^*}}{(K_{Ic}^\phi \cdot \sigma_T)^2} = \frac{1}{P^{**}}, \quad (5.14)$$

для сплавів у яких $E = const$ та $\nu = const$, об'єднує механічні властивості, що контролюють на макрорівні властивості трьох фаз при заданій температурі: кристалічної – опір пластичній деформації (σ_T), квазіаморфній – критичну густина енергії деформації (W_{c^*}) і дисипативної – критичну енергію на одиницю довжини тріщини G_{Ic} (пропорційну K_{Ic}^2).

Отже, коефіцієнт масштабу для переходу від параметрів руйнування на мікрорівні до параметрів руйнування на макрорівні об'єднує два комплекси властивостей: пружні константи (e^{**}) і критичні параметри руйнування (P^{**}):

$$i_r^c = \frac{e^{**}}{P^{**}}, \quad (5.15)$$

$$\text{де } e^{**} = \frac{E \cdot (K_{IR}^{\max})^2}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)};$$

$$p_{**} = \frac{(K_{lc}^{\phi} \cdot \sigma_T)^2}{W_c}$$

Коефіцієнт масштабу i_r^c в точці біфуркації ($K_I = K_{lc}^{\phi}$) володіє властивістю універсальності і самоподібності.

Універсальність полягає у тому, що для металів і сплавів з $E = const$ та $\nu = const$ фундаментальні механічні властивості в критичній точці пов'язані єдиною універсальною залежністю, яка інваріантна до умов навантаження, а вплив умов навантаження на параметри руйнування можна врахувати за допомогою коефіцієнта масштабу.

Самоподібність полягає у тому, що макроруйнування на всіх масштабних рівнях контролюється тільки однією розмірною сталою, що відмінна від довжини і часу.

Коефіцієнт масштабу є основою для встановлення зв'язку між фрактальною розмірністю дисипативної системи і механічними властивостями.

5.3.3. Знаходження максимального розміру автомодельності зони передруйнування та критичного розміру мікротріщини, що має властивість до самоподібного поширення.

Розглянемо ріст втомної тріщини в автомодельних (самоподібних) умовах. Зв'язок між швидкістю розвитку мікротріщини $\Delta l / \Delta N$ і коефіцієнтом інтенсивності напружень (Δk) має квадратичний характер [119]:

$$\frac{\Delta l}{\Delta N} = B \left(\frac{\Delta k}{A} \right)^2, \quad (5.16)$$

де A і B – розмірні сталі, що контролюють границі автомодельності [97].

При виконанні умови $\Delta l / \Delta N < B$ фронт тріщини рухається з великими зупинками, що пропорційні інтенсивності напружень Δk .

З цього можна зробити висновок, що автомодельність процесу руйнування визначається поведінкою металу на мікрорівні.

Середня швидкість росту тріщини $\frac{dl}{dN}$ не дорівнює $\frac{\Delta l}{\Delta N}$, оскільки розвиток мікротріщини носить стрибкоподібний характер.

Зв'язок $\frac{dl}{dN}$ з коефіцієнтом інтенсивності напружень Δk в автотельних умовах має вигляд:

$$\frac{dl}{dN} = B \left(\frac{\Delta k}{A} \right)^n. \quad (5.17)$$

Розміри сталі A і B володіють властивістю універсальності [7], так як зберігають своє постійне значення для сплавів на одній і тій же основі. Параметр n є характеристикою, яка пов'язана з динамічною структурою, що контролює швидкість руйнування при поширенні берегів тріщини.

Вибираємо два напрямки дослідження: r_c^{\max} - максимальний розмір автотельності зони передруйнування; r_c - критичний розмір мікротріщини в цій зоні, при досягненні якого макротріщина стає нестабільною і внаслідок процесу самоподібного поширення приріст тріщини рівний r_c^{\max} (рис. 5.10).

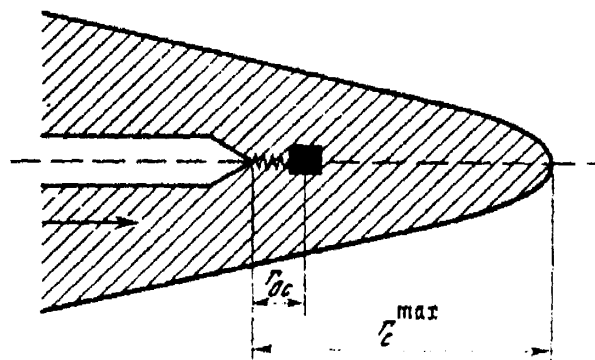


Рис. 5.10. Характерні розміри мікротріщини для точки P на рис. 5.11

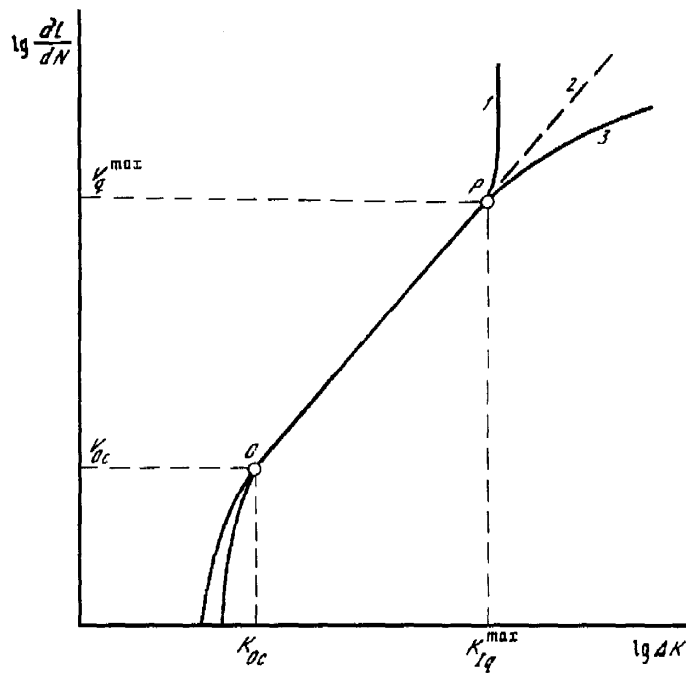


Рис. 5.11. Кінетична діаграма втомного руйнування [45]:

- 1 – нестабільність руйнування;
- 2 – пластична нестабільність з наступним руйнуванням за механізмом відриву;
- 3 – пластична нестабільність з наступним руйнуванням за механізмом зсуву.

На рис. 5.11 зображено точку біфуркації P , яка відповідає переходу макротріщини до нестійкості при досягненні $\Delta K_I = K_{Iq}^{max}$, (де ΔK_I - зміна коефіцієнта інтенсивності напружень; K_{Iq}^{max} – значення коефіцієнта K_I в точці біфуркації, що відповідає або руйнуванню або пластичній нестабільності), що з [120] визначається за допомогою формули:

$$K_{Iq}^{max} = K_{IR}^{max} \cdot \Delta^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{(n_{max} - n)}{n_{max} - n_{min}} \right], \quad (5.18)$$

де K_{IR}^{max} – розмірна стала, що контролює максимальний розмір автотрещини зони передруйнування;

1 - функція самоподібності (постійна руйнування);

n_{max} , n_{min} – параметри, що є характеристикою, пов'язаною з динамічною структурою, які контролюють швидкість руйнування під час руху берегів тріщини.

Максимальний розмір автомодельності зони передруйнування r_c^{max} розраховується згідно з [64]:

$$r_c^{max} = \left(\frac{K_{IR}^{max}}{\sigma_T} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi} \right). \quad (5.19)$$

За [42] r_{0c} – є критичним розміром кластера, в межах якого функція густини енергії деформації (dW/dV) зберігає стале значення, що дорівнює W_c^* . Зону r_{0c} можна моделювати при автомодельному поширенні мікротріщини за допомогою теорії Г.Сі [8] про сталу густину енергії деформації при субкритичному поширенні тріщини

$$\frac{S_0}{r_0} = \frac{S_{1q}}{r_{01}} = \frac{S_{2q}}{r_{02}} = \dots = \frac{S_{jq}}{r_{0j}} = \frac{S_{1c}}{r_{0c}}, \quad (5.20)$$

де S_{jq} (при $j=1, 2, 3 \dots$) – граничне значення коефіцієнта густини енергії деформації;

$r_{01}, r_{02}, \dots, r_{0j}$ – критичні розміри кластерів, які здатні самоподібно поширюватись при S_{jq} ;

r_0 і r_{0c} – мінімальний і максимальний розміри фрактальних кластерів.

Критичний розмір мікротріщини, що здатна самоподібно поширюватись, враховуючи умову $\Delta K_{Iq}^{max} = K_{IC}^\phi$, можна визначити за наступним виразом:

$$r_{0c} = \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{2\pi E} \cdot \frac{K_{IC}^\phi}{W_c^*}. \quad (5.21)$$

З врахуванням розміру зони, з густиною енергії w_c^* , в перпендикулярному напрямку до руху тріщини, отримаємо вираз для визначення критичного розміру мікротріщини:

$$r_{0c} = L_{oc} \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{2 \cdot \pi \cdot (1-\nu^2)}, \quad (5.22)$$

де L_{oc} - розмір зони, з густиною енергії w_c^* , в перпендикулярному напрямку до руху мікротріщини.

Враховуючи (5.18) та (5.21) формула для визначення r_{0c} буде мати вигляд:

$$r_{0c} = \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \cdot (K_{IR}^{\max})^2}{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \Delta \cdot W_c} \cdot \left(\frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - 2} \right)^2, \quad (5.23)$$

а також,

$$r_{0c} = \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{2 \cdot \pi \cdot E} \cdot \frac{\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T} \right)}{\left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T} - K_0 \right)}. \quad (5.24)$$

5.3.4. Знаходження фрактальної розмірності дисипативної структури.

Якщо розглядати руйнування, як нерівноважний фазовий перехід в точках біфуркації, то необхідно визначити фрактальну розмірність дисипативних структур, що контролюють руйнування.

Дисипативні структури поблизу точок біфуркації являють собою динамічну множину, що володіє властивостями універсальності і масштабної інваріантності, а також властивістю до самоподібного розвитку. Такі ж властивості характерні для фрактальних структур. Це є основою для встановлення універсального взаємозв'язку між параметрами дисипативної структури і механічними властивостями металу.

У відповідності з [47] самоподібність вказує на те, що існує функція, яка копіює множину саму на себе за допомогою скаляра Z .

Для нестандартних самоподібних форм єдине ціле можна розділити на N частин, які отримуємо через автомодельне відношення Z пов'язане з фрактальною розмірністю співвідношення:

$$Z^D = \frac{1}{N}, \quad (5.25)$$

при $0 \leq D \leq 3$.

Застосування даного співвідношення під час аналізу дисипативних структур, потребує пояснення фізичного змісту параметру N і автомодельного відношення Z [121].

Розглянемо самоподібний ріст втомної тріщини, якщо швидкість росту тріщини $\left(\frac{dl}{dN}\right)$ залежить тільки від розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень Δk у відповідності до (5.17).

При самоподібному поширенні кластера від r_{0c} до r_c^{max} відношення r_c^{max}/r_{0c} характеризує екстремальний рівень коефіцієнту масштабу при $K_I = K_{Iq}^{max}$ (рис.5.23), враховуючи (5.20) можна записати у вигляді:

$$\left(i_r^c\right)_{\max} = \frac{r_c^{\max}}{r_{0c}}, \quad (5.26)$$

де r_{0c} – мінімальний розмір фрактального кластера при $S_{Iq} = S_{Ic}$.

В межах цієї зміни кінетику поширення кластера можна записати за допомогою функції самоподібності [122] у вигляді:

$$\frac{r_{0j}^{i-1}}{r_{0j}^i} = \Delta^{1/m}, \text{ при } m=1,2,4, \dots, \infty, \quad (5.27)$$

де r_{0j}^{i-1} і r_{0j}^i - попередній і наступний розмір фрактального кластера в напрямку руху тріщини;

m - число, що змінюється за законом геометричної прогресії і визначає верхню межу блоку проміжної асимптотики при $m \rightarrow \infty$ і нижню при $m=1$.

Функція $\Delta^{1/m}$ є функцією самоподібності, що дає стиснену інформацію про кінетику самоподібного росту фрактального кластера на різних масштабних рівнях [122].

Самоподібний ріст кластера можна представити у вигляді блоків проміжної асимптотики, в якому зберігається наступна послідовність граничних розмірів фрактальних кластерів:

$$\text{I блок } \frac{r_{01}^I}{r_{02}^I} = \frac{r_{02}^I}{r_{03}^I} = \frac{r_{03}^I}{r_{04}^I} = \dots = \left(\frac{r_{0j}^{i-1}}{r_{0j}^i}\right)^I; \quad (5.28)$$

$$\text{II блок } \frac{r_{01}''}{r_{02}''} = \frac{r_{02}''}{r_{03}''} = \frac{r_{03}''}{r_{04}''} = \dots = \left(\frac{r_{0j}^{i-1}}{r_{0j}^i}\right)''. \quad (5.29)$$

Тоді за кожен цикл ітерації:

$$\frac{r_{01}^I}{r_{01}^n} = \frac{r_{01}^n}{r_{01}^m} = \dots = \frac{r_{0j}^{N-1}}{r_{0j}^N} = \Delta, \quad (5.30)$$

де Δ - стала руйнування (5.6).

Звідси бачимо, що при кожному виході з блоку проміжної асимптотики розмір фрактального кластера збільшується на величину, що рівна Δ^{-N} де N – число ітерацій ($N=1,2,3\dots$).

Це дає можливість використати автотодельну функцію $\Delta^{1/m}$ при $m \rightarrow \infty$, як функцію самоподібності Z в співвідношенні (5.25), записати у вигляді:

$$Z^D = \Delta^D = \frac{1}{i_r^c} \quad (5.31)$$

де i_r^c - коефіцієнт масштабу, що враховує відношення максимального масштабу дослідження до мінімального і характеризує критичні параметри тріщини (її максимальний приріст $l_p = r_c^{\max}$ в результаті самоподібного росту з початковою довжиною r_{0c} в точці біфуркації $\Delta K = K_{lq}^{\max} = K_{lc}^{\Phi}$).

При $r_{0c} = r_c^{\max} = 1$ розмірність об'єкта у відповідності до цього співвідношення дорівнює 0.

Максимальна розмірність D_{\max} самоподібних об'єктів не повинна перевищувати 2,95. Це дає можливість розрахувати значення $\frac{1}{i_r^c}$.

$$\Delta^{D+M} = \frac{1}{i_r^c}, \quad (5.32)$$

де $M=1$ та $M=0$.

Наявність двох значень коефіцієнта масштабу при $D=const$ є відображенням властивості синергетичної системи знаходити декілька стійких станів при переході через критичну точку. Сталі (Ст20) у яких фрактальна розмірність дисипативної структури відповідає $M=1$, мають більший запас довговічності, як сталі (Ст45) з $M=0$, так як коефіцієнт масштабу визначає кількість виділеної енергії до моменту нестабільності руйнування.

Наведемо наступні залежності, які, у повній мірі, описують зв'язок фрактальної розмірності [123] D з механічними властивостями матеріалу з якого виготовлена металокопункція:

$$\begin{aligned} \Delta^{D+M} &= \left(\frac{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}{E \cdot (K_{IR}^{\max})^2} \right) \cdot \left(\frac{(K_{\kappa}^{\Phi} \cdot \sigma_T)^2}{W_C} \right), \\ \Delta^{D+M} &= \left(\frac{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}{2 \cdot \pi \cdot E \cdot \Delta} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_T^2}{W_C} \right) \cdot \left(\frac{n_{\max} - n}{(n_{\max} - 2)} \right)^2, \\ \Delta^{D+M} &= \left(\frac{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}{(1-\nu^2)} \right) \cdot (K_{IR}^{\max})^2 \cdot \sigma_T^2 \cdot L_{0C}. \end{aligned} \quad (5.33)$$

Наявність однозначного зв'язку між коефіцієнтом масштабу, фрактальною розмірністю та механічними властивостями металу дозволяє прогнозувати поведінку металоконструкцій з використанням показників дисипативних властивостей.

5.4. Критерії руйнування, що відображають колективні ефекти при пластичній деформації та самоорганізацію дисипативної структури

Із аналізу процесу руйнування з точки зору синергетики видно, що опір руйнуванню металів визначається дисипативними властивостями. Показником дисипативних властивостей металу на стадії руйнування є фрактальна розмірність, яка враховує внесок в дисипацію енергії двох основних механізмів: пластичної деформації та утворення несучільностей. В зв'язку з цим критерії фрактальної механіки руйнувань є комплексними (дво- або трипараметричні) [120]. В лінійній і нелінійній механіці руйнувань застосовують двопараметричні критерії [124, 125].

Відмінність між двопараметричними критеріями фрактальної механіки руйнувань і критеріями лінійної механіки полягає у тому, що перші визначають умови переходу руйнування на стадію самоподібного руйнування, який вдається контролювати густиною внутрішньої енергії і її перетвореннями в процесі росту мікротріщини.

Оскільки самоподібне руйнування визначається параметрами, що володіють властивостями універсальності і масштабної інваріантності, то і

критерії, що визначають перехід до вказаного руйнування, володіють тими самими властивостями.

Встановлений універсальний взаємозв'язок між коефіцієнтом масштабу, інваріантним комплексом механічних властивостей p_{**} та фрактальною розмірністю D дозволяє ввести двопараметричний критерій, що відображає дисипативні властивості деформованого металу [120].

Звернемо увагу на точку біфуркації $K_{lq} \approx K_{lq}^{\max}$ (рис. 5.11), поблизу якої існує дисипативна структура, що не забезпечує стійкість системи і існує необхідність в новій дисипативній структурі. Перебудова дисипативних структур в цій точці контролюється p_{**} - критерієм і коефіцієнтом масштабу i_r^c .

Оскільки коефіцієнт масштабу однозначно (через пружні константи) пов'язаний з три критерієм руйнування p_{**} , доцільно для окремого розгляду дисипативних властивостей металу, пов'язаних з пластичною деформацією і з утворенням несучільностей, p_{**} критерій зобразити у вигляді [42]:

$$p_{**} = \frac{T_{\phi}^2}{\Pi \cdot \sigma_T}, \quad (5.34)$$

де $T_{\phi} = K_{IC}^{\phi} \cdot \sigma_T$ - двопараметричний показник дисипативних властивостей металу при розвитку мікротріщини;

$\Pi = W_{C^*} / \sigma_T$ - двопараметричний показник дисипативних властивостей металу при зародженні мікротріщини.

Ці показники мають універсальний характер. Універсальність Π - критерію полягає в тому, що при руйнуванні зберігається єдиний зв'язок між відносною граничною густиною енергії W_{C^*} / σ_T і відносним поперечним звуженням для сплавів на одній основі (незалежно від хімічного складу сплаву і його початкової мікроструктури):

$$\left(\frac{W_{C^*}}{\sigma_T} \right) \cdot \left(\frac{1}{\psi - \psi_0} \right) = \Delta^{-1} = const. \quad (5.35)$$

Зовнішні фактори, такі як температура, швидкість навантаження, діаметр зразка і ін., впливають на початкове відносне поперечне звуження ψ_0 , при

досягненні якого локалізація пластичної деформації забезпечує концентрацію енергії в області утворення шийки.

Відносне поперечне звуження є характеристикою дисипативних властивостей металу. Вона показує властивість матеріалу трансформувати підведену енергію в тепло: чим вище ψ , тим більше підведеної енергії було перетворено в теплову.

На стадії зародження мікротріщини критерій пошкодженості можна представити у вигляді:

$$W_c / \sigma_T \leq \Pi. \quad (5.36)$$

Проаналізуємо дисипативні властивості матеріалу на стадії розвитку тріщини, що оцінюється критерієм T_ϕ .

Універсальність цього критерію пов'язана з наявністю екстремального значення $T_\phi = T_\phi^{\max}$ для сплавів на одній основі, що не залежить від хімічного складу сплаву і його структури, а також з інваріантністю його до зовнішніх умов навантаження [118, 120].

При циклічному навантаженні параметр тріщиностійкості $K_{Iq}^{\max} = K_{IC}^\phi$ однозначно пов'язаний з параметром динамічної структури n за допомогою виразу (5.18). Це означає інваріантність K_{Iq}^{\max} до умов навантаження [126].

В [42] показано, що кінетичні діаграми, що пов'язують швидкість розвитку тріщини з коефіцієнтом інтенсивності напружень для циклічного та статичного виду навантаження єдині, тобто характеризуються одним і тим же значенням параметра n . Критерій руйнування можна представити у вигляді:

$$T_\phi \leq K_I \sigma_T. \quad (5.37)$$

Параметри, які описують процес руйнування: кількість енергії, що необхідна для самоподібного росту мікротріщини; коефіцієнт масштабу, який визначає тривалість росту мікротріщини; максимальний розмір автотривалості зони передруйнування; критичний розмір мікротріщини, що має властивість до самоподібного поширення; фрактальна розмірність дисипативної структури, покладені в основу моделювання процесу розвитку мікротріщини у металах. Оскільки, критичний розмір мікротріщини, що має

властивість до самоподібного поширення є фрактальним кластером, який буде під дією навантаження копіювати множину на себе. Максимальний розмір автомодельності 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.

Програмна реалізація даної моделі виконана в середовищі Borland Delphi (додаток Ж).

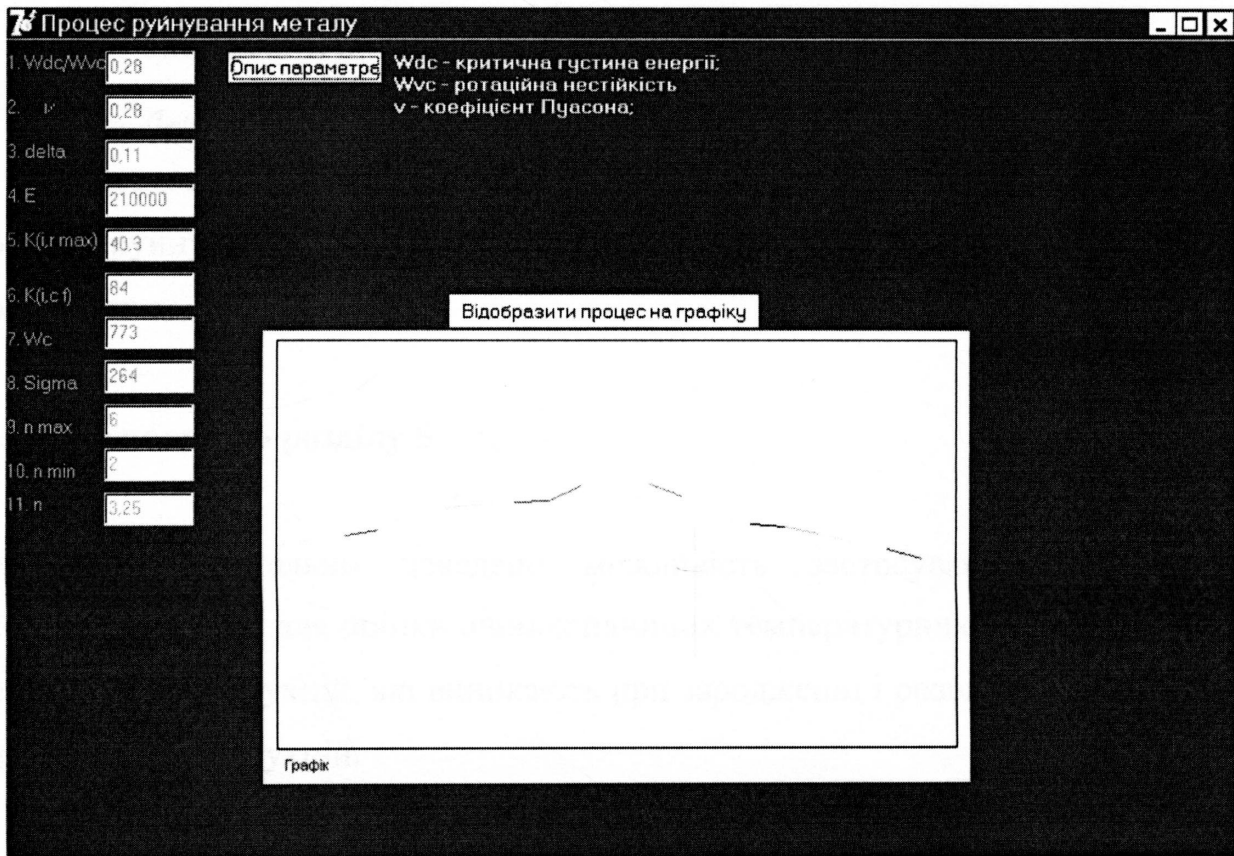


Рис. 5.12. Фрагмент моделювання процесу розвитку мікротріщини у матеріалі сталь Ст45.

Для моделювання розвитку тріщини в програму необхідно ввести наступні величини:

W_{dc} - критична густина енергії дисторсії та W_{vc} - критична густина енергії дилатації (5.5);

ν - коефіцієнт Пуасона;

Δ - стала руйнування (5.6);

E – модуль пружності;

K_{IR}^{\max} - розмірна стала, що контролює максимальний розмір автотемпературної зони передруйнування;

K_{lc}^{ϕ} - критичний коефіцієнт інтенсивності напружень у точці біфуркації;

W_c^* - критична густина енергії деформації;

σ_T - опір пластичній деформації;

n_{max}, n_{min} – параметри, пов'язані з характеристикою динамічної структури.

В результаті роботи програми можна визначити параметри, що описують процес руйнування, та одержати вид мікротріщини, яка самоподібно поширюється.

Висновки до розділу 5

Експериментально доведено можливість застосування розробленої системи контролю для оцінки швидкоплинних температурних змін на поверхні металічних конструкцій, які виникають при зародженні і розвитку мікротріщин у тілі таких конструкцій.

Експериментально доведено, що можливо контролювати момент зародження мікротріщини за стрибкоподібною зміною температури на поверхні об'єкта контролю; момент зародження та розвиток мікротріщин мають фрактальну природу.

За допомогою фрактальної механіки руйнувань знайдено універсальний взаємозв'язок між мікро- та макрохарактеристиками металів під час переходу дисипативної системи через точку біфуркації.

Визначено критичні параметри, що 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.

Програмно реалізовано модель розвитку мікротріщини у напружено-деформованих металічних конструкціях.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведене 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 мікротріщин 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 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 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 мікрodefektів 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Карпаш О.М., Зінчак Я.М., Цюцяк І.І., Данилюк Я.Б. Стан та перспективи застосування методів оцінки фактичного технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу об'єктів нафтогазового комплексу // 5-та національна науково-технічна конференція – виставка "Неруйнівний контроль та технічна діагностика". – Київ, 2005р. – С.41-45.

2. В. И. Сарак. Хрупкое разрушение металлов // Успехи физ. наук. – 1959. - т. XVII, вып. 2. – С. 341-361.

3. Дж.Коллинз. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624с.

4. В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел // Успехи физ. наук. – 1972. - т.106, вып. 2. – С. 193-228.

5. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука – 1974. – С. 138 – 153.

6. Баранов В.М., Кудрявцев Е.М. Использование кинетической теории разрушения для определения параметров акустико-эмиссионных сигналов при докритическом росте трещин в твердых телах / Акустическая эмиссия гетерогенных материалов. – Л.: ФТИ им.А.Ф.Иоффе – 1986. – С. 22 – 27.

7. В.Е.Панин, В.В.Федоров, Р.В.Ромашов и др. Явление структурно-энергетической аналогии процессов механического разрушения и плавления металлов и сплавов // Синергетика и усталостное разрушение металлов. – М.: Наука – 1989. – С.29-44.

8. Иванова В. С. Структурно-энергетическая теория усталости металлов // Циклическая прочность металлов. М.: Изд-во АН СССР. – 1962. – С. 11-12.

9. Федоров В. В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. - Ташкент: Фан, - 1985. - 167 с.

10. Федоров В. В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. – Ташкент: Фан – 1979. – 186 с.
11. Гладышев Г. П. Термодинамика и макрокинетика. Природа иерархических процессов. – М.: Мир – 1988. – 287 с.
12. Кузьменко В. А. Развитие представлений о процессе деформирования материалов. – Киев: Укр НИИНТИ – 1968. – 47 с.
13. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир – 1980. – 460 с.
14. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир – 1977. – 512 с.
15. Фракталы в физике: Тр. VI Международный Симпозиум по фракталам в физике (МЦТФ, Триест, Италия, 9-12 июля, 1985 г.). М.: Мир, 1988. - 670 с.
16. А.Д.Изотов, А.С.Баланкин, В.Б.Лазарев. Синергетика и фрактальная термомеханика неорганических материалов. II. Фрактальная геометрия разрушения твердых тел // Неорганические материалы. – 1993. – Т.29, №7. – С. 883-893.
17. В.Б.Лазарев, А.С.Баланкин, А.Д.Изотов. Синергетика и фрактальная термомеханика неорганических материалов. III. Фрактальная термомеханика разрушения твердых тел // Неорганические материалы. – 1993. – Т.29, №8. – С. 1027-1045.
18. А.С.Баланкин, А.Д.Изотов, В.Б.Лазарев. Синергетика и фрактальная термомеханика неорганических материалов. I. Термомеханика мультифракталов // Неорганические материалы. – 1993. – Т.29, №4. – С. 451-457.
19. Свирида Б.В. Лекції з опору матеріалів: навчальний посібник. Ч.1. – Івано-Франківськ: Факел. – 2003. – 469 с.
20. И.Г.Соколинская. О возможности прогнозирования и повышения надежности машин и механизмов по результатам магнитной структуроскопии деталей // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. - №2. – С.17-20.

21. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. В 2-х книгах. Книга 1. / Под. ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., перераб.и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.

22. Лютак І.З. Розробка методики та пристрою для контролю технічного стану технологічного обладнання автомобільних газонаповнюючих компресорних станцій: Дис. на здобуття наукового ступеня канд.техн.наук.: 05.11.13. – Івано-Франківськ, 2003. – 173 с.

23. Карпаш О.М., Молодецький І.А., Карпаш М.О. Общий обзор методов оценки физико-механических характеристик металлов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. - №2. – С. 18-22.

24. Испытательная техника. Справочник. Под. ред. Клюева. – М.: Машиностроение, 1982. – т. 2. – 523 с.

25. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Справочное пособие // Под. Ред. Б. С Касаткина. – Киев: Наукова думка, 1981. – 584с.

26. Михеев М. Н., Горкунов Є. С. Использование необратимых магнитных характеристик при перемагничивании ферромагнетиков в магнитном структурном анализе сталей и сплавов // В кн. Электромагнитные методы измерений и неразрушающего контроля. – Свердловск: ИФМ, 1982. – С. 3-10.

27. С. Г. Сандомирський. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (обзор) // Дефектоскопия. – 1996. – №7. – С. 25-30.

28. Безлюдько Г. Я. Эксплуатационные контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным коэрциметрическим методом // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. № 2. – С. 20-26.

29. Дубов А.А. Диагностика котельных труб с использованием магнитной памяти металла. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 420с.

30. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р.Соснин, В.Н.Филимонов и др. / Под.ред. В.В.Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 448с.

31. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля / Практическое пособие под ред. В. В. Сухорукова. – М.: Высш. школа, 1991. – 283 с.

32. Бражников Н. И. Ультразвуковые методы (физические и физико-химические методы контроля состава и свойств веществ) / Под. общ. ред. Н. Н Шумиловского. – М. – Л.: Энергия. – 1965. – 248с.

33. Ya. M. Soifer, A. Verdyan, J. Azoulau, M. Kazakevich, E. Rabkin. An AFM study of the morphology and local mechanical properties of superconducting YBCO thin films // *Physica C* 402/ - 2004. – P. 80 – 87.

34. N.Almqvist, Y.Delamo, B.L.Smith. N.H.Thomsin. Micromechanical and structural properties of pinnate diatom investigated by atomic force microscopy // *Journal of Microscopy*. – 2001. – Vol.202 – P. 518 – 532.

35. N.Tambe, B.Bhushan. Scale dependence of micro/nanofriction and adhesion of MEMS/NEMS materials, coating and lubricants // *Nanotechnology*. – 2004. – Vol.15 – P.1561-1573.

36. R.M.VanLandingham, S.J.Villarrubia, F.G.Meyers. Nanoindentation of polymers: overview // *Macromolecular Symposia*. – 2000. – Vol.41. – P.1412 – 1413.

37. G.A.Shaw, D.S.Stone, A.D.Johnson, A.B.Ellis. Shape memory effect in nanoindentation of nickel – titanium thin films // *Applied Physics Letters*. – 2003. – Vol.83, №2. – P.257-259.

38. A.Pauschitz, J.Schalko, T.Koch, C.Einsenmenger – Sittner. Nanoindentation and AFM studies of PECVD DLC and reactively sputtered Ti containing carbon films // *Bull. Mater. Sci*. – 2003. – Vol.26, №6. – P. 585 – 591.

39. K.Miyahara, N.Nagashima, S.Matsuoka. Development and application of a combined atomic force microscopy – nanoindentation system with a silicon tip

and a diamond anmeter // Philosophical Magazine A. – 2002. – Vol.82, №10. – P. 2149-2160.

40. В.А.Четвергов, С.М.Овчаренко. Физические основы надежности: Конспект лекций. – Омск, 2002. – 37с.

41. В.Р.Скальський. Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2003. - №4. – С. 29-36.

42. В.С.Иванова. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 162с.

43. Грабар І.Г. Термоактиваційний аналіз та синергетика руйнування. – Ж.: ЖІТІ, 2002р. – 430 с.

44. О.А.Кузін, Р.А.Яцюк. Металознавство та термічна обробка металів. – Л.: Афіша, 2002. – 304с.

45. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука. 1994. – 384с.

46. Хакен Г. Синергетика иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. – 420с.

47. С.В.Божокин, Д.А.Паршин. Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», - 2001. – 128с.

48. Mandelbrot В.В. The fractal geometry of nature. - N.Y.: Freeman, 1983. – 480р.

49. 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.

50. Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254с.

51. Иванова В. С., Терентьев В. А. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 455с.

52. Е.А.Попов, В.С.Иванова, В.Ф.Терентьев. К вопросу о классификации дислокационных структур и анализ многоуровневой динамики ансамблей дефектов // Синергетика и усталостное разрушение металлов. – М.: Наука, 1989. - С.153-170.

53. Болеста І. М. Фізика твердого тіла. Навчальний посібник. – Львів: Видавн. центр ЛНУ імені І. Франка. 2003. – 480 с.

54. Баланкин А.С. Синергетика деформируемого тела. – М.: МОСССР – 1991. – 404с.

55. Фирстов С.А., Саржан Г.Ф. Дислокационная структура и деформационное упрочнение ОЦК – металлов // Изв.вузов. Физика. – 1991. – Т.34, №3. – С. 23-34.

56. Я.Б.Фридман. Механические свойства металлов. Ч.2. М.: Машиностроение, 1974. – 368с.

57. Я.Б.Фридман. Механические свойства металлов. Ч.1. М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.

58. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. – М.: Нука, 1991. – 136с.

59. Фрактамы в прикладной физике: Сб. науч. трудов – ВНИИЭФ, Арзамас – 16, 1995. – 216с.

60. 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.

61. Федоров В.В. Эргодинамическая концепция прочности и разрушения твердых тел // Материалы VI Всесоюз. съезда по теоретической и прикладной механике. – Ташкент: Фан, 1986. – С. 141-148.

62. Планк М. Принцип сохранения энергии. - М.: ГОНТИ, 1938. – 235с.

63. Kuznetsov P. V., Panin V. E., Schreiber J. Fractal dimension as characteristic of deformation stages of austenite stainless steel under tensile load// Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2001. V. 35. P. 171—177.

64. Иванова В.С. Разрушение металлов. М.: Metallurgy, 1979. – 167с.
65. Трефилов В.И., Мойсеев В.Ф., Печковский Э.П. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов. – Киев: Наукова думка, 1987. – 242с.
66. Грайворонский Н.В., Саржан Г.Ф., Фирстов С.А. Механизмы деформационное упрочнение ОЦК – металлов и кривая напряжения – деформация // Металлофизика и новейшие технологии. – 1997. – Т.19, №1. – С. 67-75.
67. Криштал М. А. Механизм диффузии в железных сплавах. М.: Metallurgy, 1972. 399 с.
68. Панин В. Е., Егорушкин В. Е., Хон Ю. А., Елсукова Т. Ф. Атом-вакансионные состояния в кристаллах // Изв. вузов. Физика, 1982. № 12. С. 5-28.
69. Panin V. E. Strain-induced defects in solids at the different scale levels of plastic deformation and the nature of their sources// Mat. Sci. Engineering. 2001. V. 319—321. P. 197—200.
70. А. И. Пехович, В. М. Жидких. Расчеты теплового режима твердых тел. Л., Энергия, 1976. 352 с.
71. Воронин Г. Ф. Основы теплодинамики. – Издательство московского ун-та, 1987. – 291 с.
72. Константинов С.М. Теплообмін: Підручник. – К.: ВПІ ВПК “Політехнік”: Інтерес, 2005. – 304с.
73. Луцик Р.В. Теплообмін. – К.: КНУТД, 2004. – 126с.
74. Григорьев В. А., Зорин В. М. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник. – М.: Энергия, 1982. – 247 с.
75. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Высшая школа, 1984. – 247с.
76. С.Н.Шорин. Теплопередача. – М.: Высшая школа, 1964. – 490с.
77. Недужий И. А., Алабовский А. Л. Техническая термодинамика и теплопередача. – К.: Высшая школа, 1978. – 223 с.

78. Юдаев Б.Н. Теплопередача. – М.: Высшая школа, - 1981. – 320с.
79. Кузьмичев В. Е. Законы и формулы физики. Справочник. – К.: Наукова думка, 1989. – 861 с.
80. Исаченко В.П., Осипова В.А., Мукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, – 1981. – 461с.
81. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщинотривкість, – Львів: Світ, - 1998. – 292с.
82. Луцишин Т.І., Габльовська Н.Я., Кононенко М.А. Дослідження термомеханічних властивостей металу в момент зародження мікрodefекту // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу
83. www.pdesolutions.com
84. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 163 с.
85. Романов В.П. Перспективы развития полупроводниковых датчиков и измерителей температуры // Электронные компоненты и системы. –2001. – № 4. – С.7–8.
86. Голуб В. Датчики // Электронные компоненты и системы. –1998.– №8. – С.5–10.
87. Новиков В.Н., Пронкина А.Е. Тонкопленочные терморезисторы повышенной точности с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления // Приборы и системы управления. – 1991. – № 5. – С. 29 – 30.
88. Захаров В.И., Гусев Ю.А., Олекс А.О. Оксидно-полупроводниковые толстопленочные терморезисторы // Приборы и системы управления. – 1991. – № 5. – С.33 – 35.
89. Каталог. Термопреобразователи сопротивления, термопреобразователи термоэлектрические, термопреобразователи с

- унифіцированным токовым выходным сигналом /НПП Дана-Терм, 2003. – 28 с.
90. Каталог. Термопреобразователи / НПФ "КонтрАвт", ПК Тесей, март, 2004. – 149с.
91. Le Bol, A.Boequet. Comparison of an integral equation on energy and the ray-tracing technique in room acoustics // The Journal of the Acoustical Society of America, -2000. – Vol.108, № 4. – P. 26 – 30.
92. N.S.Boltovets, V.V.Kholevchuk, R.V.Konakova, V.F.Mitin. Ge-film resistance and Si-based diode temperature microsensors for cryogenic applications // Sensors and Actuators A, – 2001. – Vol.92 – P. 191 – 196.
93. Ненашев А. П. Конструирование радиоэлектронных средств. – К.: Наукова думка, – 1988. – 396 с.
94. Піндус Наталія Миколаївна. Система контролю теплових і акустичних характеристик динамічних випромінювачів звуку: дисертація на здобуття наукового ступеня к. т. н.: 05.11.13. – Івано-Франківськ 2004. – С. 223.
95. Меркулова С.В. Терминология устанавливающейся предметной области в современных условиях коммуникации. Сборник трудов X сессии Российского акустического общества. Том.2. – М.: ГЕОС, - 2000. – 332с.
96. 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.
97. Джон Барис. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. – М.: Мир, 1990. – 238 с.
98. Поліщук Є. С., Дорожевець М. М., Яцук В. О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник. – Львів: Видавництво “Бескид Біт”, 2003. – 544 с.
99. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 399 с.

100. Болтон У. Карманный справочник инженера - метролога. – М.: Издательский дом "Додэка-XXI", 2002. – 384с.
101. Цербст М. Контрольно-измерительная техника: Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 320с.
102. Е.Т.Володарский, В.И.Губарь, Л.Л.Никифоров, В.М.Туз. Система автоматизированого контроля радиоэлектронной аппаратуры. – К.: Техніка, 1983. – 151с.
103. Габльовська Н.Я. Дослідження динамічних характеристик системи контролю процесу утворення тріщин в металевих конструкціях // Materiály IV mezinárodní vědesko-praktická conference "Vědecký průmysl evropského kontinentu - 2007". – Díl 14. Technické vědy: Praha. Publishing House "Education and Science"s.r.o – 80 stran.
104. Технический контроль в машиностроении: Справочник проектировщика / Под общ.ред. В.Н.Чуприна, А.Д.Никифорова, - М.: Машиностроение, - 1987. – 512с.
105. Чеховський С.А., Габльовська Н.Я. Дослідження метрологічних характеристик системи контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях // Збірка тез доповідей 5-ої науково-технічної конференції "Приладобудування 2006: стан і перспективи". – К.: НТУУ "КПІ", 2006. – С. 240.
106. Головка Д.Б., Рего К.Г., Б.О.Скрипник. Основи метрології та вимірювань. – К.: Либідь, - 2001. – 408с.
107. П.Л.Свердан. Вища математика. Аналіз інформації у фармації та медицині: Підручник. – Львів: Світ, - 1998. – 332с.
108. 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.
109. Я.Д.Колкер. Математический анализ точности механической обработки деталей. – К.: Техника, - 1979. – 200с.

110. Степанов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, - 1972. – 232с.

111. В.М.Иванова, В.И.Калинина, Л.А. Нешумова, И.О.Решетникова. Математическая статистика. – М.: Высшая школа, - 1975. – 398с.

112. 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 "ГПНВ", 2004. - С. 201-202.

113. Габльовська Н.Я. Термодинамічні ефекти як інформативний параметр для контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конструкціях //Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Приладобудування. – К.: НТУУ "КПІ", 2005. – Випуск 30. – С. 85-94.

114. 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 "ГПНВ", 2004. - С. 202-203.

115. Р-50 2.773.061 ТО. Техническое описание и инструкция по эксплуатации разрывной машины. – М.: Изд-во стандартов, 1962. – 122 с.

116. 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 "ГПНВ", 2005. - С. 236-237.

117. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография: Усталостное разрушение. - Челябинск: Metallurgiya, 1988. – 399с.

118. Бурба В.И. Взаимосвязь критериев предельного состояния в точках бифуркации при деформации и разрушении конструкционных сталей. - М. - 1988. - 53с. – Деп. в ВИНТИ 24.05.88, №4157-В88.

119. Слабый хаос и квазирегулярные структуры / Г.М.Заславский, Р.З.Сагдеев, Д.А.Усиков, А.А.Черников. – М.: Наука, 1991. – 157с.

120. Иванова В.С. Синергетика разрушения и механические свойства // Синергетика и усталостное разрушение металлов. – М.: Наука – 1989. – С.6 - 29.

121. 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.

122. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. – М.: Прогрес. 1986. – 432с.

123. Uozumi J., Asakura T. Optikal fraktals // Optikal Storage and Retrieval, Memory, Neural Networks, and Fraktals / Eds: Yu F.T.S., Jutamulia S. NY.: Marsel Dekker – 1996. Ch. 9. – P. 283 – 320.

124. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, - 1985. – 502с.

125. Партон В.З., Борисовский В.Г. Динамика хрупкого разрушения. – М.: Машиностроение. – 1988. – 239с.

126. Иванова В.С., Шанявский А.А. Количественная фрактография: Усталостное разрушение. – Челябинск: Metallurgiya, - 1988. – 399с.

Додаток А

Текст програми для моделювання температурного розподілу та визначення температурних залежностей

```

select
  regrid=off { use fixed grid }
  ngrid=10   { smaller grid for quicker run }

coordinates
  cartesian3

variables
  Tp(threshold=0.1) { the temperature variable, with approximate size }

definitions
  long = 0.008
  widex = 0.0075
  widey = 0.010
  w=0.005  A=4.5e-5
  K          { thermal conductivity -- values supplied later }
  Q = sqrt(2/Pi)^3*A/w^3*exp((-2*(x)^2-(y)^2-(z+0.001)^2)/w^2)
  *(sign(-t+0.1)+1)/(2) { Thermal source }
  tmax = 6   { plot range control }

initial values
  Tp = 15.

equations
  div[k*grad(Tp)] + Q = dt(Tp) { the heat equation }

extrusion z = -long,0

boundaries

  Region 1 { define full domain boundary in base plane }
  layer 1 k=0.000013 { bottom right brick }
  start(-widex,-widey)
  { value(Tp) = 15 } { fix all side temps }
  line to (widex,-widey) { walk outer boundary in base plane }
  NOBC (Tp)
  line to (widex,widey)
  { value(Tp) = 15 } { fix all side temps }
  line to (-widex,widey)

```

NOBC (Tp)
line to close

time 0 to 0.1 by 0.01 { establish time range and initial timestep }

monitors

```

for cycle=1
  contour(Tp) on z=0 as "XY Temp" range=(15,tmax)
  contour(Tp) on x=0 as "YZ Temp" range=(15,tmax)
  contour(Tp) on y=0 as "XZ Temp" range=(15,tmax)
  elevation(Tp) from (-widex,0,0) to (widex,0,0) as "X-Axis Temp"
range=(15,tmax)
  elevation(Tp) from (0,-widey,0) to (0,widey,0) as "Y-Axis Temp"
range=(15,tmax)
  elevation(Tp) from (0,0,-long) to (0,0,0) as "Z-Axis Temp" range=(15,tmax)

```

plots

```

for t = endtime
  contour(Tp) on z=0 as "XY Temp" range=(15,tmax)
  contour(Tp) on x=0 as "YZ Temp" range=(15,tmax)
  contour(Tp) on y=0 as "XZ Temp" range=(15,tmax)

```

histories

```

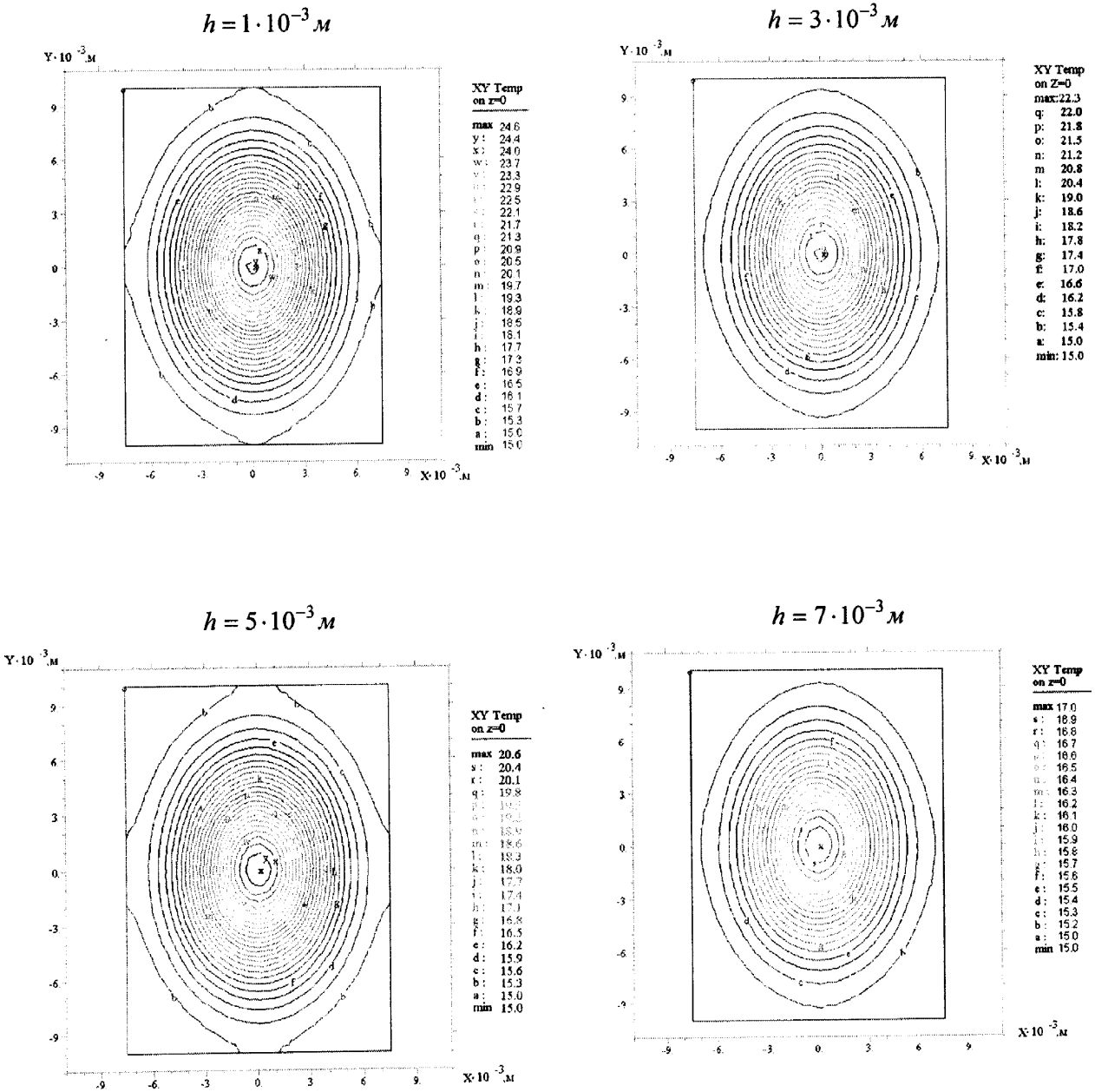
history(Tp) at (widex/2,-widey/2,0)
(widex/2,widey/2,0)
(-widex/2,widey/2,0)
(-widex/2,-widey/2,0)
(0,0,0) range=(15,tmax)

```

end

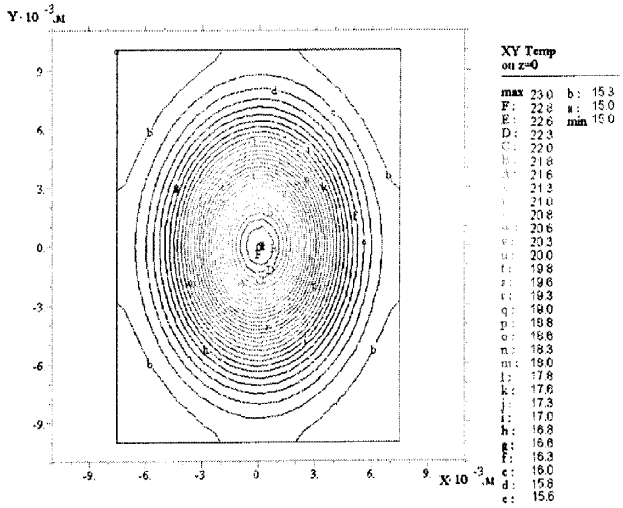
Додаток Б

Температурний розподіл на поверхні зразка з матеріалу сталь Ст20 при глибині h залягання мікротріщини

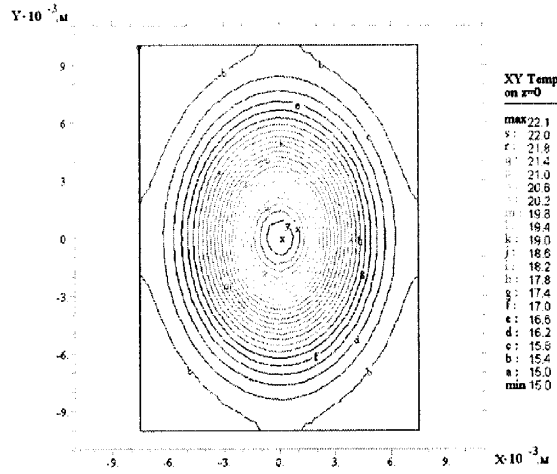


Температурний розподіл на поверхні зразка з матеріалу сталь Ст45 при глибині h залягання мікротріщини

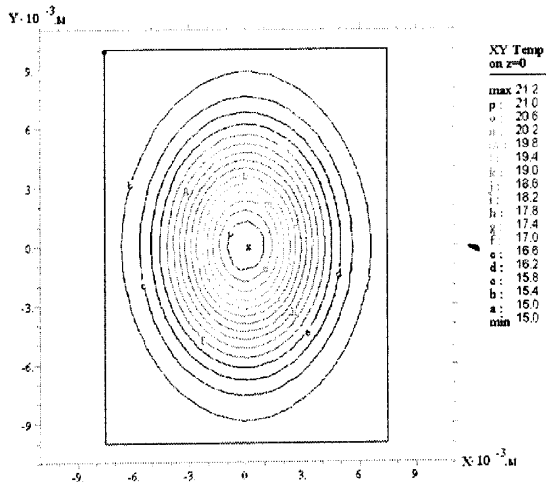
$h = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



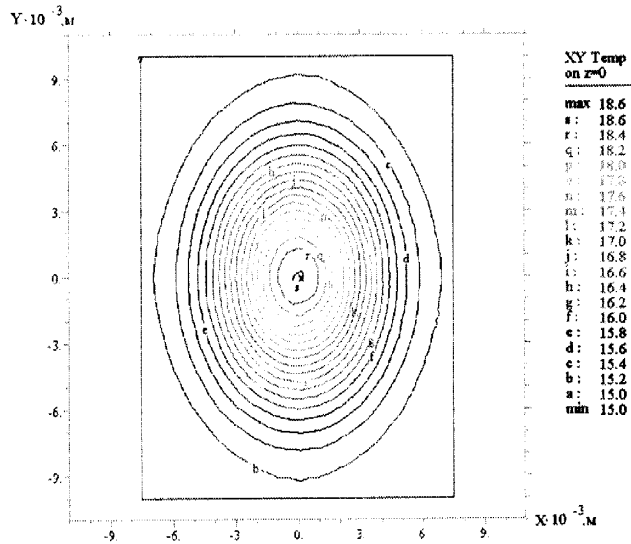
$h = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



$h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

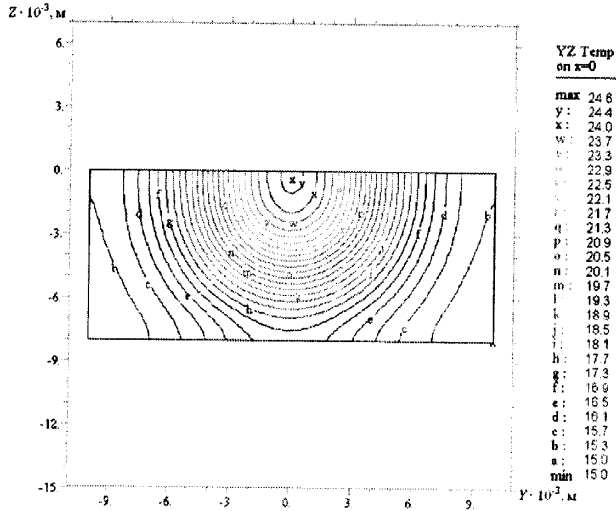


$h = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

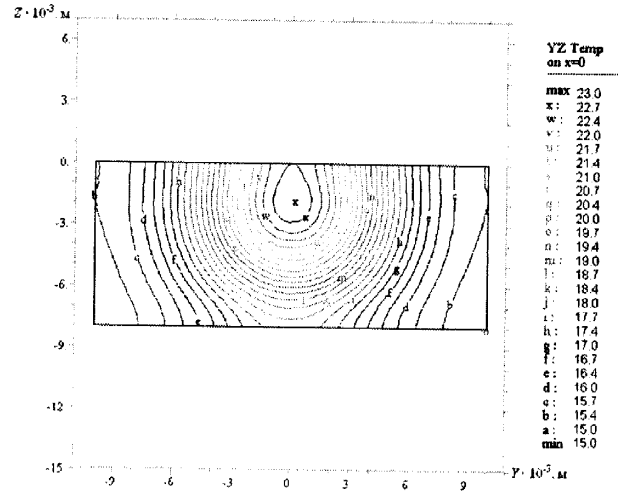


Температурний розподіл по горизонтальній площі перерізу зразка з матеріалу сталь Ст20 при глибині h залягання мікротріщини

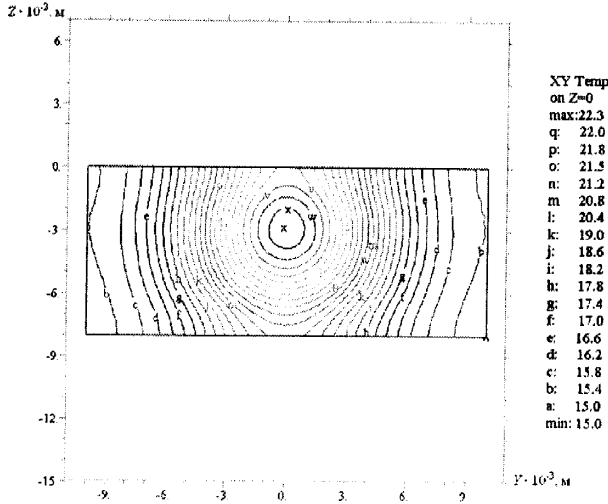
$h = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



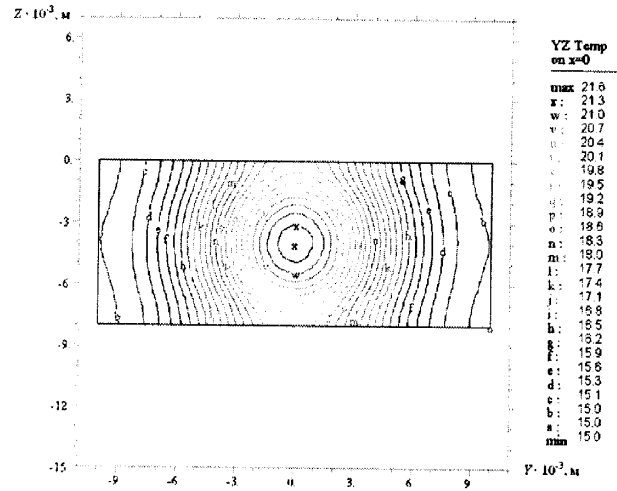
$h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



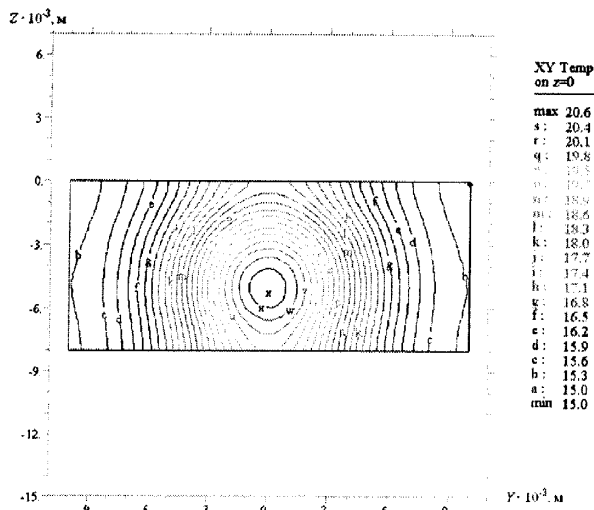
$h = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



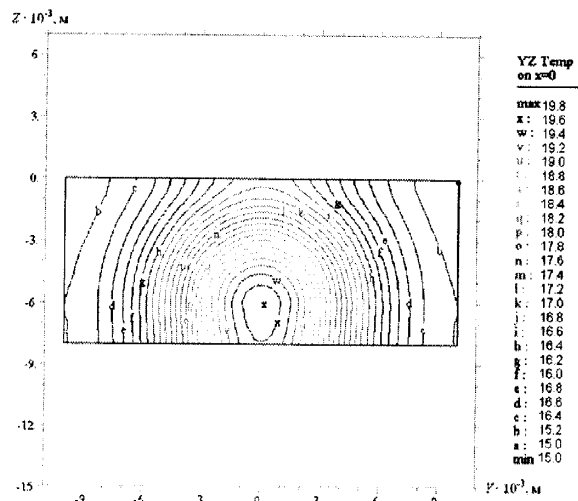
$h = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



$h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

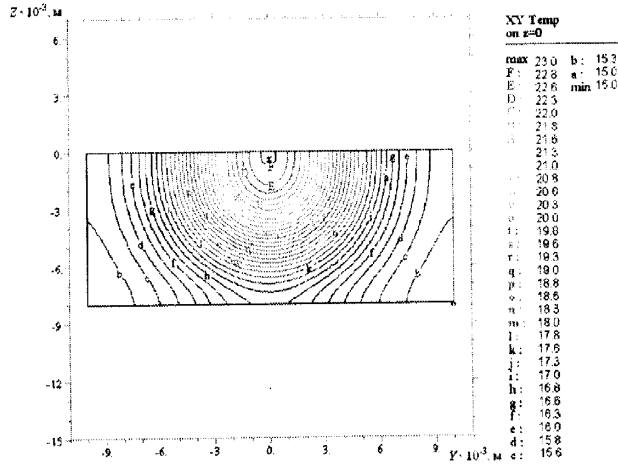


$h = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

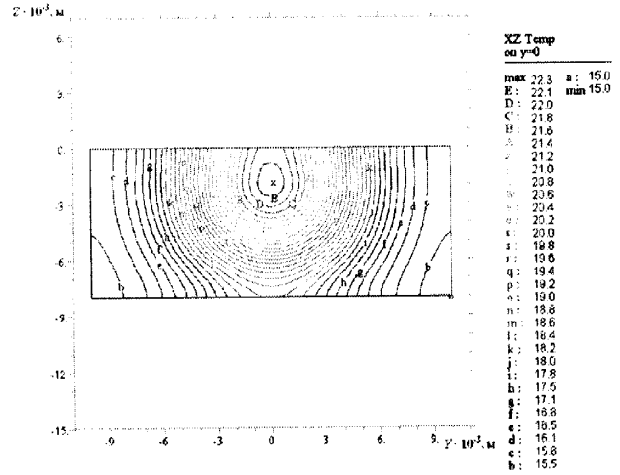


Температурний розподіл по горизонтальній площі перерізу зразка з матеріалу сталь Ст45 при глибині h залягання мікротріщини

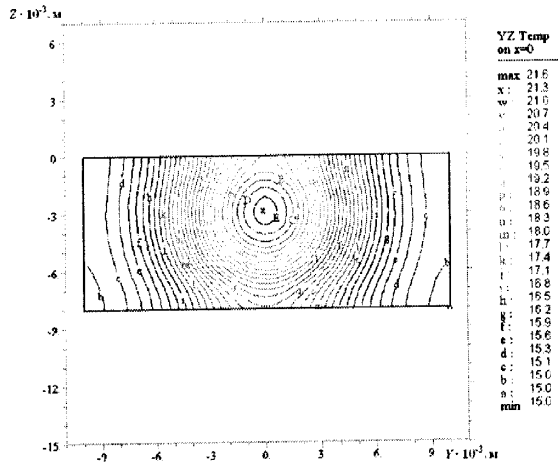
$h = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



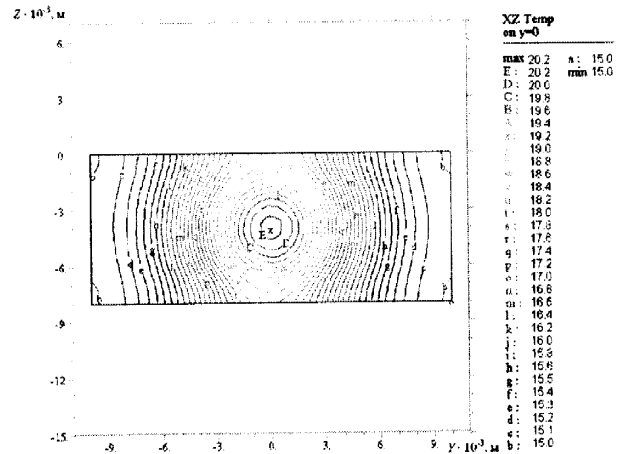
$h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



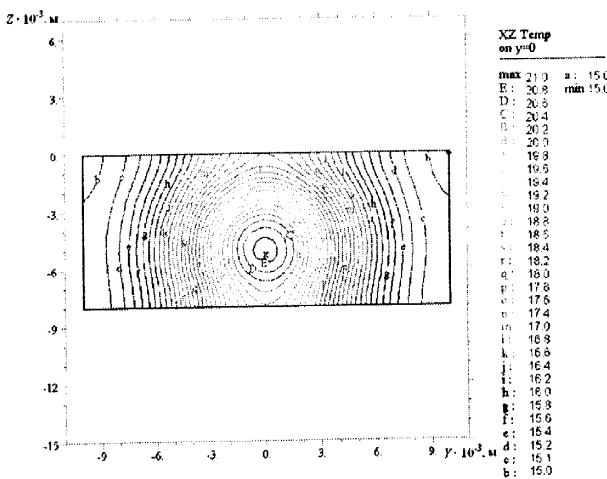
$h = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



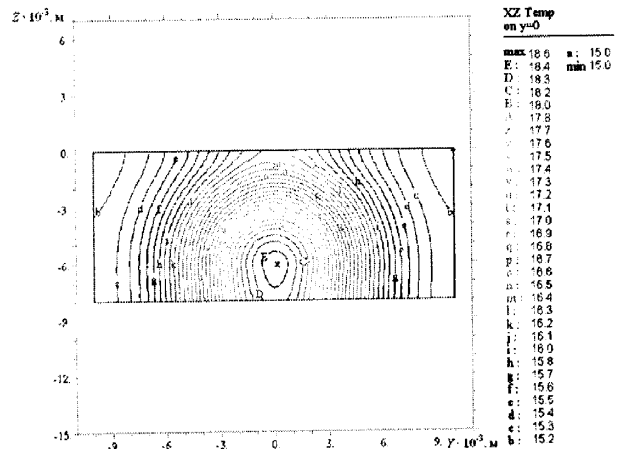
$h = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



$h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



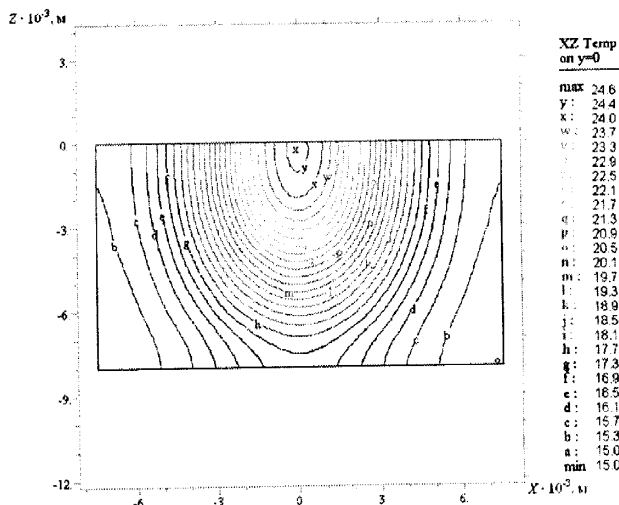
$h = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



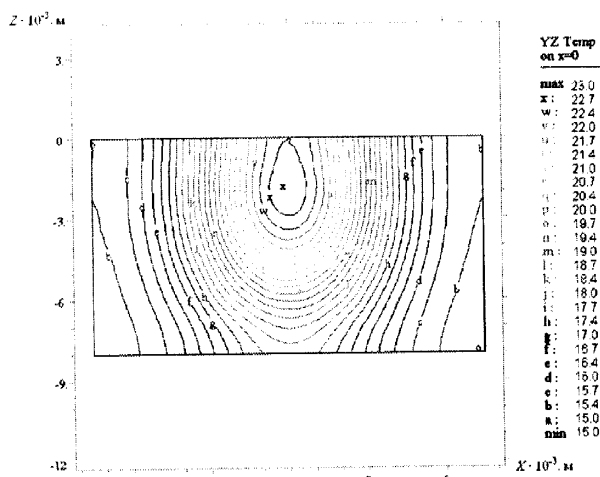
Додаток Д

Температурний розподіл по вертикальній площі перерізу зразка з матеріалу сталь Ст20 при глибині h залягання мікротріщини

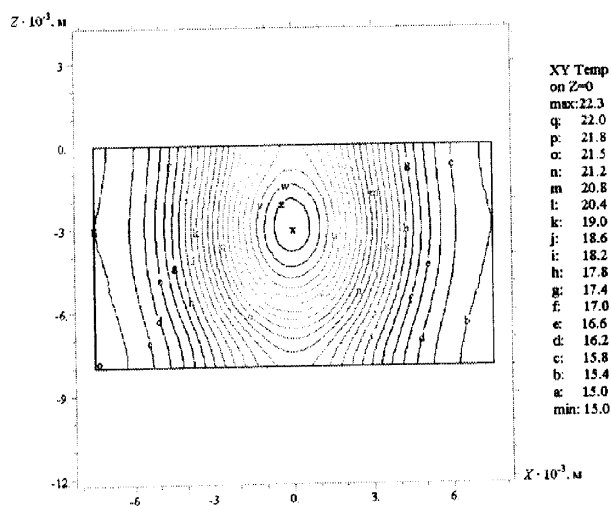
$h = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



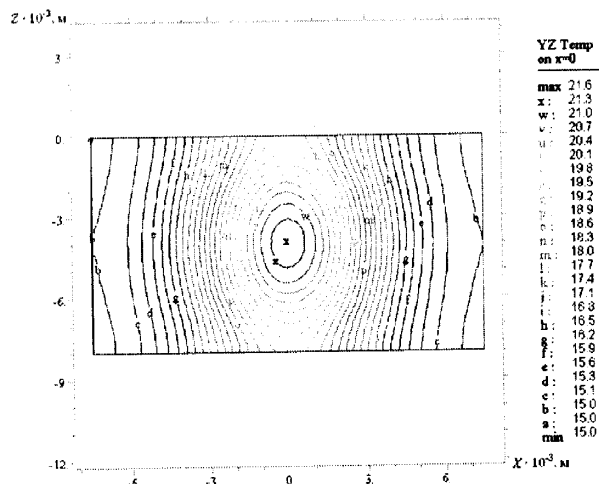
$h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



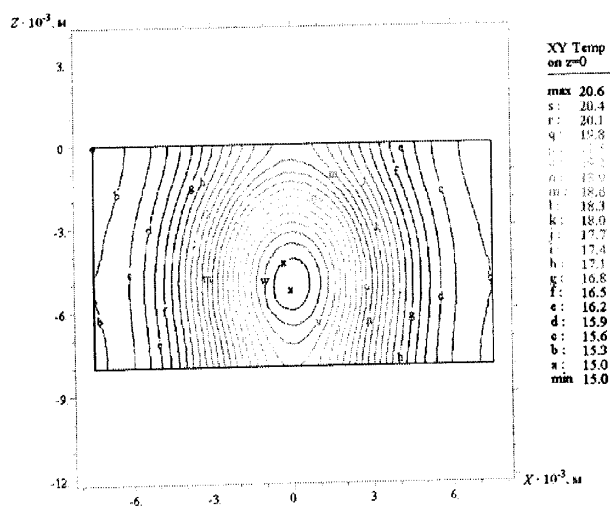
$h = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



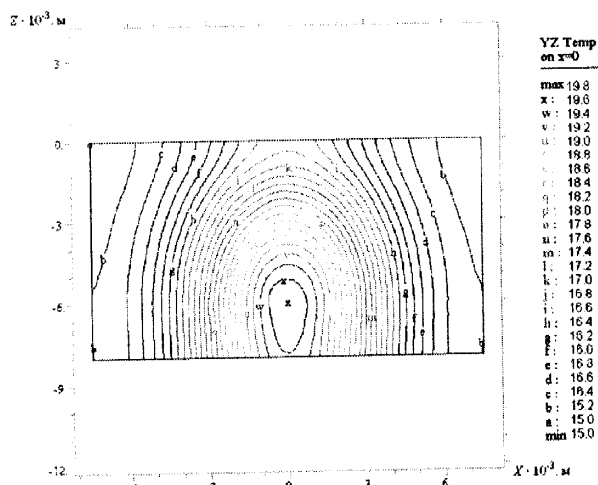
$h = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



$h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

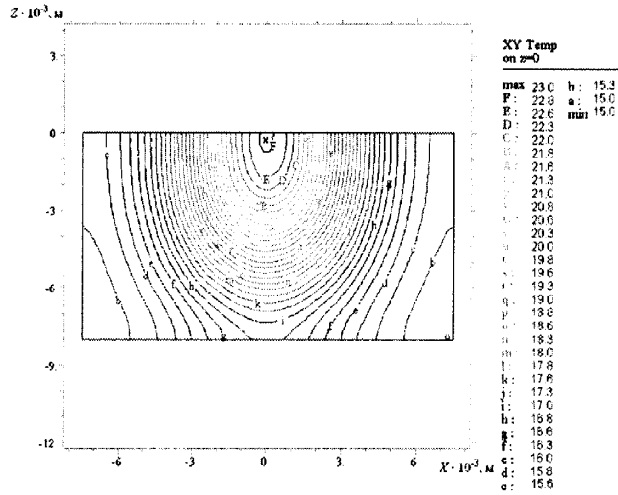


$h = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

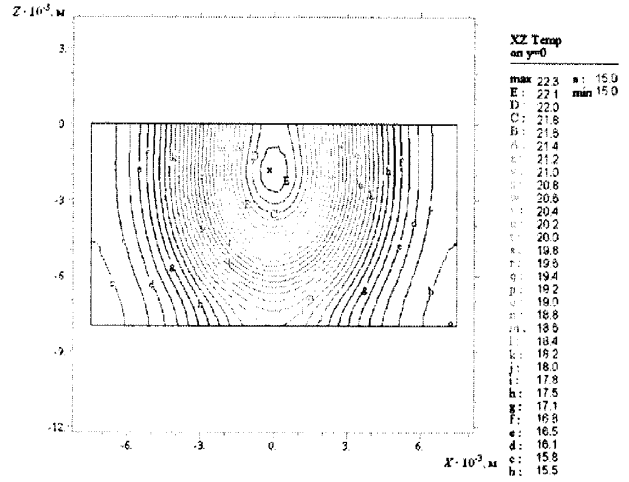


Температурний розподіл по вертикальній площі перерізу зразка з матеріалу сталь Ст45 при глибині h залягання мікротріщини

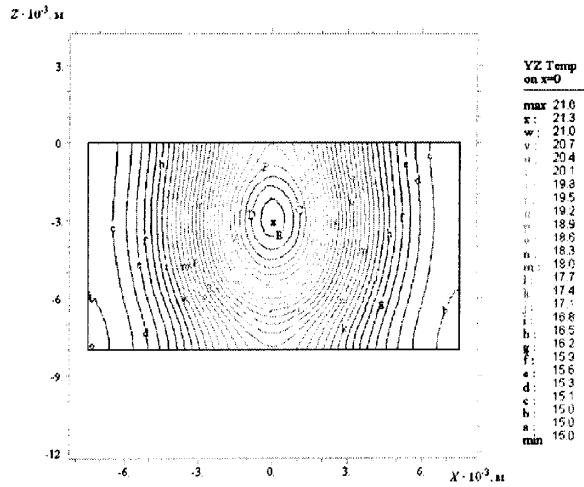
$h = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



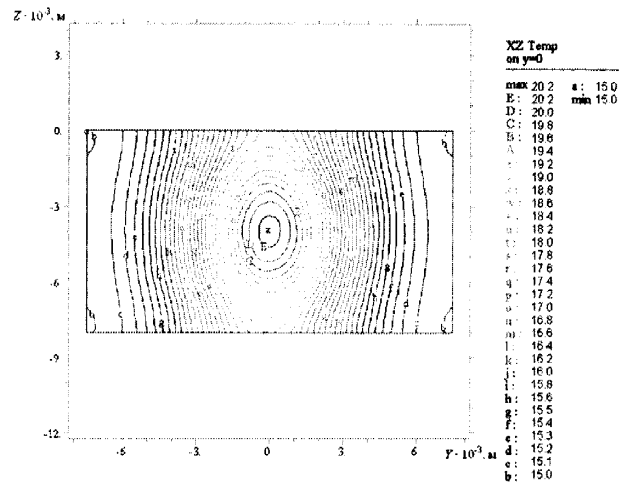
$h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



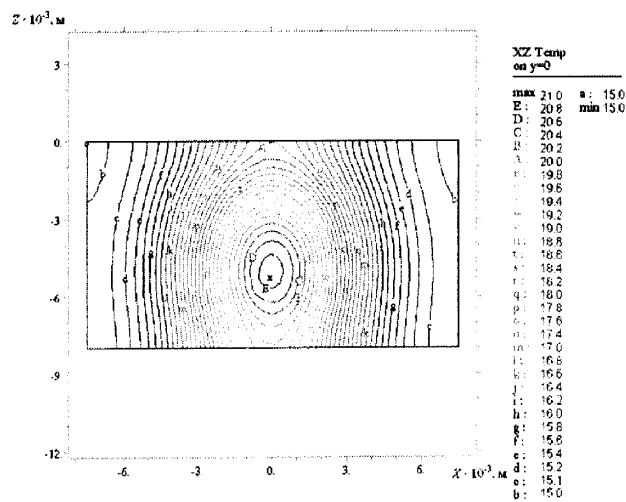
$h = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



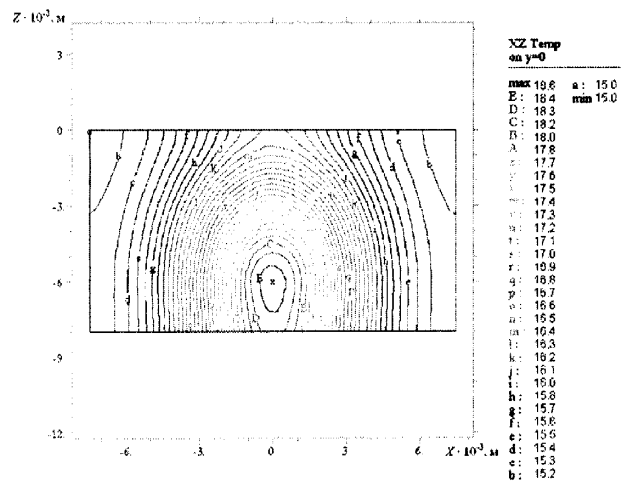
$h = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



$h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



$h = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$



Додаток Е

Залежність напруги від температури в робочому діапазоні температур

при струмі через *p-n* перехід 100мкА ($dU/dt = -1.6708 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$)

| T, °C | U, В |
|-------|------------|
| 0 | 0,75811568 |
| 1 | 0,75657497 |
| 2 | 0,75503409 |
| 3 | 0,7534932 |
| 4 | 0,75195231 |
| 5 | 0,75041142 |
| 6 | 0,74887053 |
| 7 | 0,74732964 |
| 8 | 0,74578876 |
| 9 | 0,74424787 |
| 10 | 0,74270698 |
| 11 | 0,74116609 |
| 12 | 0,7396252 |
| 13 | 0,73808432 |
| 14 | 0,73641794 |
| 15 | 0,7347328 |
| 16 | 0,73304767 |
| 17 | 0,73136254 |
| 18 | 0,72967741 |
| 19 | 0,72799228 |
| 20 | 0,72630715 |
| 21 | 0,72462202 |

| T, °C | U, В |
|-------|------------|
| 22 | 0,72293689 |
| 23 | 0,72125176 |
| 24 | 0,71956663 |
| 25 | 0,71788149 |
| 26 | 0,71619636 |
| 27 | 0,71451123 |
| 28 | 0,7128261 |
| 29 | 0,71114097 |
| 30 | 0,70946037 |
| 31 | 0,70778509 |
| 32 | 0,70610981 |
| 33 | 0,70443453 |
| 34 | 0,70275925 |
| 35 | 0,70108397 |
| 36 | 0,69940869 |
| 37 | 0,6977334 |
| 38 | 0,69605812 |
| 39 | 0,69438284 |
| 40 | 0,69270756 |
| 41 | 0,69103228 |
| 42 | 0,689357 |
| 43 | 0,68768172 |

| T, °C | U, В |
|-------|------------|
| 44 | 0,68600644 |
| 45 | 0,68433116 |
| 46 | 0,68263619 |
| 47 | 0,68091616 |
| 48 | 0,67919613 |
| 49 | 0,6774761 |
| 50 | 0,67575607 |
| 51 | 0,67403605 |
| 52 | 0,67231602 |
| 53 | 0,67059599 |
| 54 | 0,66887596 |
| 55 | 0,66715593 |
| 56 | 0,6654359 |
| 57 | 0,66371588 |
| 58 | 0,66199585 |
| 59 | 0,66027582 |
| 60 | 0,65855579 |
| 61 | 0,65683576 |
| 62 | 0,65511574 |
| 63 | 0,65339571 |
| 64 | 0,65167568 |
| 65 | 0,64995565 |

Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона (при температурі 0°С)

| $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | X_c | Частота | $m_i X_c$ | $m_i(X_c - X_{\text{сєр}})^2$ | X | $\Phi((X - X_{\text{сєр}})/s)$ | $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | P | $n P x$ | $(n p_i - m_i) / n p_i$ |
|--------------------|---------------------|-----------|---------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------|----------|-------------------------|
| -0,13946 | -0,12246 | -0,13096 | 9 | -1,17864 | 0,07737875 | -0,12246 | 0,011371717 | -0,13946 | -0,12246 | 0,023164434 | 11,37172 | 0,494652 |
| -0,122459 | -0,105459 | -0,113959 | 28 | -3,19085 | 0,16054892 | -0,105459 | 0,034536151 | -0,122459 | -0,105459 | 0,052667782 | 23,16443 | 1,009422 |
| -0,105458 | -0,088458 | -0,096958 | 62 | -6,0114 | 0,21378897 | -0,088458 | 0,087203933 | -0,105458 | -0,088458 | 0,09728082 | 52,66778 | 1,653578 |
| -0,088457 | -0,071457 | -0,079957 | 100 | -7,9957 | 0,17405963 | -0,071457 | 0,184484753 | -0,088457 | -0,071457 | 0,145978375 | 97,28082 | 0,076006 |
| -0,071456 | -0,054456 | -0,062956 | 113 | -7,11403 | 0,06904881 | -0,054456 | 0,330463127 | -0,071456 | -0,054456 | 0,17796826 | 145,9784 | 7,450235 |
| -0,054455 | -0,037455 | -0,045955 | 185 | -8,50168 | 0,01102129 | -0,037455 | 0,508431387 | -0,054455 | -0,037455 | 0,176277153 | 177,9683 | 0,277833 |
| -0,037454 | -0,020454 | -0,028954 | 180 | -5,21172 | 0,01550982 | -0,020454 | 0,68470854 | -0,037454 | -0,020454 | 0,141856298 | 176,2772 | 0,078624 |
| -0,020453 | -0,003453 | -0,011953 | 147 | -1,75709 | 0,10155124 | -0,003453 | 0,826564838 | -0,020453 | -0,003453 | 0,092745528 | 141,8563 | 0,18651 |
| -0,003452 | 0,013548 | 0,005048 | 101 | 0,509848 | 0,18922874 | 0,013548 | 0,919310366 | -0,003452 | 0,013548 | 0,049262318 | 92,74553 | 0,734659 |
| 0,013549 | 0,030549 | 0,022049 | 49 | 1,080401 | 0,17808301 | 0,030549 | 0,968572684 | 0,013549 | 0,030549 | 0,021256581 | 49,26232 | 0,001397 |
| 0,03055 | 0,04755 | 0,03905 | 19 | 0,74195 | 0,11349099 | 0,04755 | 0,989829264 | 0,03055 | 0,04755 | 0,007450778 | 21,25658 | 0,239557 |
| 0,047551 | 0,064551 | 0,056051 | 7 | 0,392357 | 0,06223099 | 0,064551 | 0,997280043 | 0,047551 | 0,064551 | 0,002719957 | 7,450778 | 0,027272 |

Сума n 1000 -38,2365 1,36594116 χ^2 1 1000 14,9497

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i = 14,94970246$$

$$\chi^2_{*} = 16,91897762$$

Так як $\chi^2 < \chi^2_{*}$ (χ^2_{*} - критичне значення критерію), то немає підстав заперечувати нормальний розподіл випадкових величин

Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона
(при температурі 5⁰С)

| X _{нижнє} | X _{верхнє} | X _c | Частота | m _i X _c | m _i (X _c -X _{ср}) ² | X | Φ((X-X _{ср})/s) | X _{нижнє} | X _{верхнє} | P | nP _x | (n p _i - m _i) ² / n p _i |
|--------------------|---------------------|----------------|---------|-------------------------------|--|----------|---------------------------|--------------------|---------------------|-------------|-----------------|--|
| 4,943636 | 4,961636 | 4,952636 | 7 | 34,66845 | 0,065385 | 4,961636 | 0,011713698 | 4,943636 | 4,961636 | 0,024143984 | 24,14398 | 0,054204 |
| 4,961637 | 4,979637 | 4,970637 | 23 | 114,3247 | 0,14226078 | 4,979637 | 0,035857682 | 4,961637 | 4,979637 | 0,05500693 | 55,00693 | 2,614829 |
| 4,979638 | 4,997638 | 4,988638 | 67 | 334,2387 | 0,24641667 | 4,997638 | 0,090864612 | 4,979638 | 4,997638 | 0,101291464 | 101,2915 | 0,930539 |
| 4,997639 | 5,015639 | 5,006639 | 111 | 555,7369 | 0,20185819 | 5,015639 | 0,192156076 | 4,997639 | 5,015639 | 0,150763759 | 150,7638 | 2,093017 |
| 5,01564 | 5,03364 | 5,02464 | 133 | 668,2771 | 0,08077032 | 5,03364 | 0,342919835 | 5,01564 | 5,03364 | 0,181386142 | 181,3861 | 0,409064 |
| 5,033641 | 5,051641 | 5,042641 | 190 | 958,1018 | 0,008383 | 5,051641 | 0,524305977 | 5,033641 | 5,051641 | 0,176401 | 176,401 | 3,951297 |
| 5,051642 | 5,069642 | 5,060642 | 150 | 759,0963 | 0,01935277 | 5,069642 | 0,700706977 | 5,051642 | 5,069642 | 0,138671353 | 138,6714 | 2,165422 |
| 5,069643 | 5,087643 | 5,078643 | 156 | 792,2683 | 0,13447012 | 5,087643 | 0,83937833 | 5,069643 | 5,087643 | 0,088115531 | 88,11553 | 0,392972 |
| 5,087644 | 5,105644 | 5,096644 | 94 | 479,0845 | 0,21084476 | 5,105644 | 0,927493861 | 5,087644 | 5,105644 | 0,045256592 | 45,25659 | 0,112519 |
| 5,105645 | 5,123645 | 5,114645 | 43 | 219,9297 | 0,18370214 | 5,123645 | 0,972750453 | 5,105645 | 5,123645 | 0,018786738 | 18,78674 | 0,078353 |
| 5,123646 | 5,141646 | 5,132646 | 20 | 102,6529 | 0,13898656 | 5,141646 | 0,99153719 | 5,123646 | 5,141646 | 0,00630276 | 6,30276 | 0,014543 |
| 5,141647 | 5,159647 | 5,150647 | 6 | 30,90388 | 0,06164751 | 5,159647 | 0,997839951 | 5,141647 | 5,159647 | 0,002160049 | 2,160049 | 2,160049 |

Сума

n 1000 5049,283 1,49407783

1 1000 16,87365

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i$$

16,87364505

$$\chi^2^*$$

16,91897762

Так як $\chi^2 < \chi^2^*$ (χ^2^* - критичне значення критерію), то немає підстав заперечувати нормальний розподіл випадкових величин

Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона
(при температурі 10⁰С)

| X _{нижнє} | X _{верхнє} | X _c | Частота | m _i X _c | m _i (X _c -X _{срєд}) ² | X | Φ((X-X _{срєд})/s) | X _{нижнє} | X _{верхнє} | P | nP _x | (n p _i - m _i) ² / n p _i |
|--------------------|---------------------|----------------|---------|-------------------------------|--|-----------|-----------------------------|--------------------|---------------------|-------------|-----------------|--|
| 9,945254 | 9,960254 | 9,952754 | 6 | 59,71652 | 0,04069456 | 9,960254 | 0,008709497 | 9,945254 | 9,960254 | 0,019925531 | 19,92553 | 1,217576 |
| 9,960255 | 9,975255 | 9,967755 | 15 | 149,5163 | 0,06804941 | 9,975255 | 0,028635028 | 9,960255 | 9,975255 | 0,048480327 | 48,48033 | 0,249847 |
| 9,975256 | 9,990256 | 9,982756 | 45 | 449,224 | 0,12333996 | 9,990256 | 0,077115354 | 9,975256 | 9,990256 | 0,094386389 | 94,38639 | 6,950759 |
| 9,990257 | 10,005257 | 9,997757 | 120 | 1199,731 | 0,16742502 | 10,005257 | 0,171501744 | 9,990257 | 10,005257 | 0,14705117 | 147,0512 | 0,028611 |
| 10,005258 | 10,020258 | 10,012758 | 145 | 1451,85 | 0,07244042 | 10,020258 | 0,318552913 | 10,005258 | 10,020258 | 0,183341697 | 183,3417 | 0,293989 |
| 10,020259 | 10,035259 | 10,027759 | 176 | 1764,886 | 0,00950923 | 10,035259 | 0,50189461 | 10,020259 | 10,035259 | 0,182935047 | 182,935 | 0,133133 |
| 10,03526 | 10,05026 | 10,04276 | 178 | 1787,611 | 0,01041839 | 10,05026 | 0,684829656 | 10,03526 | 10,05026 | 0,146074833 | 146,0748 | 0,694865 |
| 10,050261 | 10,065261 | 10,057761 | 136 | 1367,855 | 0,06978036 | 10,065261 | 0,830904489 | 10,050261 | 10,065261 | 0,093344182 | 93,34418 | 1,216428 |
| 10,065262 | 10,080262 | 10,072762 | 104 | 1047,567 | 0,147442 | 10,080262 | 0,924248671 | 10,065262 | 10,080262 | 0,047732472 | 47,73247 | 0,01124 |
| 10,080263 | 10,095263 | 10,087763 | 47 | 474,1249 | 0,13030243 | 10,095263 | 0,971981143 | 10,080263 | 10,095263 | 0,019531166 | 19,53117 | 0,120037 |
| 10,095264 | 10,110264 | 10,102764 | 18 | 181,8498 | 0,08238839 | 10,110264 | 0,991512309 | 10,095264 | 10,110264 | 0,006394325 | 6,394325 | 2,033192 |
| 10,110265 | 10,125265 | 10,117765 | 10 | 101,1777 | 0,06831933 | 10,125265 | 0,997906635 | 10,110265 | 10,125265 | 0,002093365 | 2,093365 | 2,093365 |

Сума

n 1000 10035,11 0,9901095

1 1000

15,88596

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i \quad 15,8859594$$

χ^2^*

16,91897762

Так як $\chi^2 < \chi^2^*$ (χ^2^* - критичне значення критерію), то немає підстав запережувати нормальний розподіл випадкових величин

Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона
(при температурі 15°C)

| $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | X_c | Частота | $m_i X_c$ | $m_i(X_c - X_{\text{сєр}})^2$ | X | $\Phi((X - X_{\text{сєр}})/s)$ | $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | P | nP _x | $(n p_i - m_i) / \sqrt{n p_i}$ |
|--------------------|---------------------|-----------|---------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------|-----------------|--------------------------------|
| 14,94732 | 14,96132 | 14,95432 | 5 | 74,7716 | 0,02882487 | 14,96132 | 0,007833998 | 14,94732 | 14,96132 | 0,019237476 | 19,23748 | 0,544835 |
| 14,961321 | 14,975321 | 14,968321 | 16 | 239,4931 | 0,06135811 | 14,975321 | 0,027071474 | 14,961321 | 14,975321 | 0,048597218 | 48,59722 | 0,052495 |
| 14,975322 | 14,989322 | 14,982322 | 47 | 704,1691 | 0,10795177 | 14,989322 | 0,075668692 | 14,975322 | 14,989322 | 0,096927389 | 96,92739 | 5,026445 |
| 14,989323 | 15,003323 | 14,996323 | 119 | 1784,562 | 0,13695311 | 15,003323 | 0,172596081 | 14,989323 | 15,003323 | 0,152646487 | 152,6465 | 0,045883 |
| 15,003324 | 15,017324 | 15,010324 | 150 | 2251,549 | 0,05954142 | 15,017324 | 0,325242568 | 15,003324 | 15,017324 | 0,189825599 | 189,8256 | 0,508585 |
| 15,017325 | 15,031325 | 15,024325 | 180 | 2704,379 | 0,00631352 | 15,031325 | 0,515068166 | 15,017325 | 15,031325 | 0,18640662 | 186,4066 | 0,156816 |
| 15,031326 | 15,045326 | 15,038326 | 181 | 2721,937 | 0,01181268 | 15,045326 | 0,701474786 | 15,031326 | 15,045326 | 0,144545827 | 144,5458 | 0,505246 |
| 15,045327 | 15,059327 | 15,052327 | 136 | 2047,116 | 0,06630105 | 15,059327 | 0,846020613 | 15,045327 | 15,059327 | 0,088506411 | 88,50641 | 0,634461 |
| 15,059328 | 15,073328 | 15,066328 | 96 | 1446,367 | 0,12497357 | 15,073328 | 0,934527024 | 15,059328 | 15,073328 | 0,042790233 | 42,79023 | 2,436055 |
| 15,073329 | 15,087329 | 15,080329 | 53 | 799,2574 | 0,13293271 | 15,087329 | 0,977317257 | 15,073329 | 15,087329 | 0,016333539 | 16,33354 | 0,333388 |
| 15,08733 | 15,10133 | 15,09433 | 14 | 211,3206 | 0,05749207 | 15,10133 | 0,993650796 | 15,08733 | 15,10133 | 0,004921944 | 4,921944 | 0,75049 |
| 15,101331 | 15,115331 | 15,108331 | 3 | 45,32499 | 0,01829113 | 15,115331 | 0,99857274 | 15,101331 | 15,115331 | 0,00142726 | 1,42726 | 1,42726 |

Сума n 1000 15030,25 0,81274601

1 1000 13,44717

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i \quad 13,44717$$

$$\chi^2^* \quad 16,91897762$$

Так як $\chi^2 < \chi^2^*$ (χ^2^* - критичне значення критерію), то немає підстав заперечувати нормальний розподіл випадкових величин

**Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона
(при температурі 25⁰С)**

| $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | X_c | Частота | $m_i X_c$ | $m_i(X_c - X_{\text{сєр}})^2$ | X | $\Phi((X - X_{\text{сєр}})/s)$ | $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | P | $n P x$ | $(n p_i - m_i)^2 / n p_i$ |
|--------------------|---------------------|-----------|---------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------|----------|---------------------------|
| 24,94807 | 24,95907 | 24,95357 | 7 | 174,675 | 0,02557984 | 24,95907 | 0,009051212 | 24,94807 | 24,95907 | 0,020304754 | 20,30475 | 0,912639 |
| 24,959071 | 24,970071 | 24,964571 | 16 | 399,4331 | 0,03912404 | 24,970071 | 0,029355967 | 24,959071 | 24,970071 | 0,048860341 | 48,86034 | 0,771493 |
| 24,970072 | 24,981072 | 24,975572 | 55 | 1373,656 | 0,08130577 | 24,981072 | 0,078216308 | 24,970072 | 24,981072 | 0,094368529 | 94,36853 | 3,678469 |
| 24,981073 | 24,992073 | 24,986573 | 113 | 2823,483 | 0,08513024 | 24,992073 | 0,172584837 | 24,981073 | 24,992073 | 0,146297019 | 146,297 | 3,709926 |
| 24,992074 | 25,003074 | 24,997574 | 123 | 3074,702 | 0,03326993 | 25,003074 | 0,318881856 | 24,992074 | 25,003074 | 0,182053406 | 182,0534 | 0,023161 |
| 25,003075 | 25,014075 | 25,008575 | 180 | 4501,544 | 0,005333761 | 25,014075 | 0,500935261 | 25,003075 | 25,014075 | 0,181855304 | 181,8553 | 0,565916 |
| 25,014076 | 25,025076 | 25,019576 | 192 | 4803,759 | 0,00592582 | 25,025076 | 0,682790565 | 25,014076 | 25,025076 | 0,145819944 | 145,8199 | 0,533476 |
| 25,025077 | 25,036077 | 25,030577 | 137 | 3429,189 | 0,03755415 | 25,036077 | 0,828610509 | 25,025077 | 25,036077 | 0,093856161 | 93,85616 | 1,096332 |
| 25,036078 | 25,047078 | 25,041578 | 104 | 2604,324 | 0,07897927 | 25,047078 | 0,92246667 | 25,036078 | 25,047078 | 0,048489313 | 48,48931 | 0,251093 |
| 25,047079 | 25,058079 | 25,052579 | 45 | 1127,366 | 0,06690412 | 25,058079 | 0,970955983 | 25,047079 | 25,058079 | 0,020106706 | 20,10671 | 0,220733 |
| 25,05808 | 25,06908 | 25,06358 | 18 | 451,1444 | 0,0442106 | 25,06908 | 0,991062689 | 25,05808 | 25,06908 | 0,006691355 | 6,691355 | 1,636012 |
| 25,069081 | 25,080081 | 25,074581 | 10 | 250,7458 | 0,03667575 | 25,080081 | 0,997754043 | 25,069081 | 25,080081 | 0,002245957 | 2,245957 | 2,245957 |

Сума n 1000 25014,02 0,53999714 χ^2 1 1000 16,11006

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i = 16,11005692$$

$$\chi^2^* = 16,91897762$$

Так як $\chi^2 < \chi^2^*$ (χ^2^* - критичне значення критерію), то немає підстав заперечувати нормальний розподіл випадкових величин

Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона
(при температурі 30°С)

| $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | X_c | Частота | $m_i X_c$ | $m_i (X_c - X_{\text{сєр}})^2$ | X | $\Phi((X - X_{\text{сєр}})/s)$ | $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | P | $n P x$ | $(n p_i - m_i)^2 / n p_i$ |
|--------------------|---------------------|-----------|---------|-----------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------|----------|---------------------------|
| 30,01554 | 30,02254 | 30,01904 | 11 | 330,2094 | 0,01539734 | 30,02254 | 0,015032525 | 30,01554 | 30,02254 | 0,027554746 | 27,55475 | 0,236864 |
| 30,022541 | 30,029541 | 30,026041 | 25 | 750,651 | 0,02312277 | 30,029541 | 0,042587272 | 30,022541 | 30,029541 | 0,058813788 | 58,81379 | 0,650685 |
| 30,029542 | 30,036542 | 30,033042 | 65 | 1952,148 | 0,03562592 | 30,036542 | 0,101401059 | 30,029542 | 30,036542 | 0,103058588 | 103,0586 | 2,784935 |
| 30,036543 | 30,043543 | 30,040043 | 120 | 3604,805 | 0,03231593 | 30,043543 | 0,204459648 | 30,036543 | 30,043543 | 0,14826117 | 148,2612 | 0,010728 |
| 30,043544 | 30,050544 | 30,047044 | 147 | 4416,915 | 0,01301476 | 30,050544 | 0,352720818 | 30,043544 | 30,050544 | 0,175113368 | 175,1134 | 2,086196 |
| 30,050545 | 30,057545 | 30,054045 | 156 | 4688,431 | 0,00090482 | 30,057545 | 0,527834186 | 30,050545 | 30,057545 | 0,169810541 | 169,8105 | 0,003869 |
| 30,057546 | 30,064546 | 30,061046 | 169 | 5080,317 | 0,00356463 | 30,064546 | 0,697644726 | 30,057546 | 30,064546 | 0,135195602 | 135,1956 | 0,625457 |
| 30,064547 | 30,071547 | 30,068047 | 126 | 3788,574 | 0,01693602 | 30,071547 | 0,832840328 | 30,064547 | 30,071547 | 0,088370327 | 88,37033 | 2,102153 |
| 30,071548 | 30,078548 | 30,075048 | 102 | 3067,655 | 0,03526765 | 30,078548 | 0,921210655 | 30,071548 | 30,078548 | 0,04742247 | 47,42247 | 0,052477 |
| 30,078549 | 30,085549 | 30,082049 | 49 | 1474,02 | 0,03210174 | 30,085549 | 0,968633125 | 30,078549 | 30,085549 | 0,020891911 | 20,89191 | 0,058772 |
| 30,08555 | 30,09255 | 30,08905 | 22 | 661,9591 | 0,02337592 | 30,09255 | 0,989525036 | 30,08555 | 30,09255 | 0,007555547 | 7,555547 | 0,026145 |
| 30,092551 | 30,099551 | 30,096051 | 8 | 240,7684 | 0,01254379 | 30,099551 | 0,997080582 | 30,092551 | 30,099551 | 0,002919418 | 2,919418 | 2,919418 |

Сума n 1000 30056,45 0,24417128 χ^2 16,91897762

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i = 12,63943741$$

Так як $\chi^2 < \chi^2_{\text{критичне}}$ ($\chi^2_{\text{критичне}}$ - критичне значення критерію), то немає підстав заперечувати нормальний розподіл випадкових величин

Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона
(при температурі 35°С)

| $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | X_c | Частота | $m_i X_c$ | $m_i (X_c - X_{\text{сєр}})^2$ | X | $\Phi((X - X_{\text{сєр}})/s)$ | $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | P | $n P X$ | $(n p_i - m_i) / n p_i$ |
|--------------------|---------------------|-----------|---------|-----------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------|----------|-------------------------|
| 35,02755 | 35,03355 | 35,03055 | 6 | 210,1833 | 0,00654331 | 35,03355 | 0,008945986 | 35,02755 | 35,03355 | 0,020128789 | 20,12879 | 1,306809 |
| 35,033551 | 35,039551 | 35,036551 | 15 | 525,5483 | 0,01095324 | 35,039551 | 0,029074775 | 35,033551 | 35,039551 | 0,048541253 | 48,54125 | 0,258347 |
| 35,039552 | 35,045552 | 35,042552 | 45 | 1576,915 | 0,01988566 | 35,045552 | 0,077616028 | 35,039552 | 35,045552 | 0,093945126 | 93,94513 | 7,791423 |
| 35,045553 | 35,051553 | 35,048553 | 121 | 4240,875 | 0,02729948 | 35,051553 | 0,171561154 | 35,045553 | 35,051553 | 0,145926191 | 145,9262 | 0,025425 |
| 35,051554 | 35,057554 | 35,054554 | 144 | 5047,856 | 0,01171461 | 35,057554 | 0,317487346 | 35,051554 | 35,057554 | 0,181930492 | 181,9305 | 0,264011 |
| 35,057555 | 35,063555 | 35,060555 | 175 | 6135,597 | 0,00159449 | 35,063555 | 0,499417838 | 35,057555 | 35,063555 | 0,182053854 | 182,0539 | 0,090269 |
| 35,063556 | 35,069556 | 35,066556 | 178 | 6241,847 | 0,00158336 | 35,069556 | 0,681471692 | 35,063556 | 35,069556 | 0,146223248 | 146,2232 | 1,799945 |
| 35,069557 | 35,075557 | 35,072557 | 130 | 4559,432 | 0,01049142 | 35,075557 | 0,82769494 | 35,069557 | 35,075557 | 0,094264097 | 94,2641 | 1,461123 |
| 35,075558 | 35,081558 | 35,078558 | 106 | 3718,327 | 0,02380073 | 35,081558 | 0,921959037 | 35,075558 | 35,081558 | 0,048772167 | 48,77217 | 0,030911 |
| 35,081559 | 35,087559 | 35,084559 | 50 | 1754,228 | 0,02201955 | 35,087559 | 0,970731204 | 35,081559 | 35,087559 | 0,020252 | 20,252 | 0,150874 |
| 35,08756 | 35,09356 | 35,09056 | 22 | 771,9923 | 0,01602196 | 35,09356 | 0,990983204 | 35,08756 | 35,09356 | 0,006748395 | 6,748395 | 0,232131 |
| 35,093561 | 35,099561 | 35,096561 | 8 | 280,7725 | 0,0087054 | 35,099561 | 0,997731599 | 35,093561 | 35,099561 | 0,002268401 | 2,268401 | 2,268401 |

Сума

n 1000 35063,57 0,1606132

I 1000 16,64981

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i = 16,64980598$$

$$\chi^2^* = 16,91897762$$

Так як $\chi^2 < \chi^2^*$ (χ^2^* - критичне значення критерію), то немає підстав заперечувати нормальний розподіл випадкових величин

Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона
(при температурі 40°С)

| $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | X_c | Частота | $m_i X_c$ | $m_i (X_c - X_{\text{сєр}})^2$ | X | $\Phi((X - X_{\text{сєр}})/s)$ | $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | P | pRx | $(n p_i - m_i) / n p_i$ |
|--------------------|---------------------|-----------|---------|-----------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------|----------|-------------------------|
| 39,99234 | 39,99734 | 39,99484 | 9 | 359,9536 | 0,00670046 | 39,99734 | 0,011574988 | 39,99234 | 39,99734 | 0,023361189 | 23,36119 | 0,921125 |
| 39,997341 | 40,002341 | 39,999841 | 28 | 1119,996 | 0,01390472 | 40,002341 | 0,034936177 | 39,997341 | 40,002341 | 0,052848445 | 52,84844 | 1,584738 |
| 40,002342 | 40,007342 | 40,004842 | 62 | 2480,3 | 0,01852051 | 40,007342 | 0,087784622 | 40,002342 | 40,007342 | 0,097258762 | 97,25876 | 0,031174 |
| 40,007343 | 40,012343 | 40,009843 | 99 | 3960,974 | 0,01493501 | 40,012343 | 0,185043383 | 40,007343 | 40,012343 | 0,145614369 | 145,6144 | 6,863803 |
| 40,012344 | 40,017344 | 40,014844 | 114 | 4561,692 | 0,00604423 | 40,017344 | 0,330657753 | 40,012344 | 40,017344 | 0,177366657 | 177,3667 | 0,523217 |
| 40,017345 | 40,022345 | 40,019845 | 187 | 7483,711 | 0,00097249 | 40,022345 | 0,50802441 | 40,017345 | 40,022345 | 0,175767482 | 175,7675 | 0,028356 |
| 40,022346 | 40,027346 | 40,024846 | 178 | 7124,423 | 0,00131744 | 40,027346 | 0,683791892 | 40,022346 | 40,027346 | 0,141711006 | 141,711 | 0,484842 |
| 40,027347 | 40,032347 | 40,029847 | 150 | 6004,477 | 0,00894334 | 40,032347 | 0,825502897 | 40,027347 | 40,032347 | 0,092952266 | 92,95227 | 0,274115 |
| 40,032348 | 40,037348 | 40,034848 | 98 | 3923,415 | 0,01586259 | 40,037348 | 0,918455163 | 40,032348 | 40,037348 | 0,049601393 | 49,60139 | 0,878572 |
| 40,037349 | 40,042349 | 40,039849 | 43 | 1721,714 | 0,01350733 | 40,042349 | 0,968056556 | 40,037349 | 40,042349 | 0,021532031 | 21,53203 | 0,558554 |
| 40,04235 | 40,04735 | 40,04485 | 25 | 1001,121 | 0,01291012 | 40,04735 | 0,989588587 | 40,04235 | 40,04735 | 0,007603386 | 7,603386 | 0,047883 |
| 40,047351 | 40,052351 | 40,049851 | 7 | 280,349 | 0,00538094 | 40,052351 | 0,997191973 | 40,047351 | 40,052351 | 0,002808027 | 2,808027 | 2,808027 |

Сума

n 1000 40022,13 0,11899919

1 1000 15,57724

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i = 15,5772422$$

χ^2^*

16,91897762

Так як $\chi^2 < \chi^2^*$ (χ^2^* - критичне значення критерію), то немає підстав заперечувати нормальний розподіл випадкових величин

Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона (при температурі 45°C)

| $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | X_c | Частота | $m_i X_c$ | $m_i(X_c - X_{\text{сєр}})^2$ | X | $\Phi((X - X_{\text{сєр}})/s)$ | $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | P | $n P x$ | $(n p_i - m_i)^2 / n p_i$ |
|--------------------|---------------------|-----------|---------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------|----------|---------------------------|
| 45,00466 | 45,00966 | 45,00716 | 7 | 315,0501 | 0,00484377 | 45,00966 | 0,013188475 | 45,00466 | 45,00966 | 0,026517339 | 26,51734 | 0,46655 |
| 45,009661 | 45,014661 | 45,012161 | 23 | 1035,28 | 0,01043904 | 45,014661 | 0,039705814 | 45,009661 | 45,014661 | 0,059236122 | 59,23612 | 1,017585 |
| 45,014662 | 45,019662 | 45,017162 | 67 | 3016,15 | 0,01780835 | 45,019662 | 0,098941936 | 45,014662 | 45,019662 | 0,106853384 | 106,8534 | 0,160916 |
| 45,019663 | 45,024663 | 45,022163 | 111 | 4997,46 | 0,01417926 | 45,024663 | 0,20579532 | 45,019663 | 45,024663 | 0,155652539 | 155,6525 | 2,659893 |
| 45,024664 | 45,029664 | 45,027164 | 176 | 7924,781 | 0,00698823 | 45,029664 | 0,361447859 | 45,024664 | 45,029664 | 0,183106684 | 183,1067 | 0,05271 |
| 45,029665 | 45,034665 | 45,032165 | 180 | 8105,79 | 0,00030432 | 45,034665 | 0,544554544 | 45,029665 | 45,034665 | 0,173955539 | 173,9555 | 3,298934 |
| 45,034666 | 45,039666 | 45,037166 | 150 | 6755,575 | 0,00205432 | 45,039666 | 0,718510082 | 45,034666 | 45,039666 | 0,133461652 | 133,4617 | 0,820057 |
| 45,039667 | 45,044667 | 45,042167 | 123 | 5540,187 | 0,00931359 | 45,044667 | 0,851971735 | 45,039667 | 45,044667 | 0,082689265 | 82,68926 | 1,54715 |
| 45,044668 | 45,049668 | 45,047168 | 94 | 4234,434 | 0,01764992 | 45,049668 | 0,934660999 | 45,044668 | 45,049668 | 0,041371258 | 41,37126 | 0,064122 |
| 45,049669 | 45,054669 | 45,052169 | 43 | 1937,243 | 0,01504269 | 45,054669 | 0,976032257 | 45,049669 | 45,054669 | 0,016714006 | 16,71401 | 0,64603 |
| 45,05467 | 45,05967 | 45,05717 | 20 | 901,1434 | 0,01123829 | 45,05967 | 0,992746264 | 45,05467 | 45,05967 | 0,005452092 | 5,452092 | 0,055062 |
| 45,059671 | 45,064671 | 45,062171 | 6 | 270,373 | 0,00494412 | 45,064671 | 0,998198356 | 45,059671 | 45,064671 | 0,001801644 | 1,801644 | 1,801644 |

Сума n 1000 45033,47 0,11480591 χ^2 16,91897762

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i = 15,49449471$$

χ^2^*

16,91897762

Так як $\chi^2 < \chi^2^*$ (χ^2^* - критичне значення критерію), то немає підстав запереувати нормальний розподіл випадкових величин

**Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона
(при температурі 50°С)**

| $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | X_c | Частота | $m_i X_c$ | $m_i (X_c - X_{\text{ср}})^2$ | X | $\Phi((X - X_{\text{ср}})/s)$ | $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | P | $n P_x$ | $(n p_i - m_i)^2 / n p_i$ |
|--------------------|---------------------|-----------|---------|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|--------------------|---------------------|-------------|----------|---------------------------|
| 49,98905 | 49,99126 | 49,990155 | 5 | 249,9508 | 0,0007191 | 49,99126 | 0,007847465 | 49,98905 | 49,99126 | 0,019247736 | 19,24774 | 0,548001 |
| 49,991261 | 49,993471 | 49,992366 | 16 | 799,8779 | 0,00153083 | 49,993471 | 0,027095201 | 49,991261 | 49,993471 | 0,048592593 | 48,59259 | 0,052196 |
| 49,993472 | 49,995682 | 49,994577 | 47 | 2349,745 | 0,00269366 | 49,995682 | 0,075687794 | 49,993472 | 49,995682 | 0,096879763 | 96,87976 | 5,050641 |
| 49,995683 | 49,997893 | 49,996788 | 119 | 5949,618 | 0,00341814 | 49,997893 | 0,172567556 | 49,995683 | 49,997893 | 0,152546385 | 152,5464 | 0,042506 |
| 49,997894 | 50,000104 | 49,998999 | 150 | 7499,85 | 0,00148692 | 50,000104 | 0,325113942 | 49,997894 | 50,000104 | 0,189713848 | 189,7138 | 0,605051 |
| 50,000105 | 50,002315 | 50,00121 | 179 | 8950,217 | 0,00015731 | 50,002315 | 0,514827789 | 50,000105 | 50,002315 | 0,186352531 | 186,3525 | 0,029699 |
| 50,002316 | 50,004526 | 50,003421 | 184 | 9200,629 | 0,00029843 | 50,004526 | 0,701180321 | 50,002316 | 50,004526 | 0,144580531 | 144,5805 | 0,774293 |
| 50,004527 | 50,006737 | 50,005632 | 134 | 6700,755 | 0,00162703 | 50,006737 | 0,845760852 | 50,004527 | 50,006737 | 0,088595145 | 88,59515 | 0,219005 |
| 50,006738 | 50,008948 | 50,007843 | 93 | 4650,729 | 0,00301684 | 50,008948 | 0,934355997 | 50,006738 | 50,008948 | 0,042875731 | 42,87573 | 4,017341 |
| 50,008949 | 50,011159 | 50,010054 | 56 | 2800,563 | 0,00350075 | 50,011159 | 0,977231728 | 50,008949 | 50,011159 | 0,016386257 | 16,38626 | 0,117276 |
| 50,01116 | 50,01337 | 50,012265 | 15 | 750,184 | 0,00153547 | 50,01337 | 0,993617984 | 50,01116 | 50,01337 | 0,00494504 | 4,94504 | 1,753931 |
| 50,013371 | 50,015581 | 50,014476 | 2 | 100,029 | 0,00030399 | 50,015581 | 0,998563025 | 50,013371 | 50,015581 | 0,001436975 | 1,436975 | 1,436975 |

Сума

n 1000 50002,15 0,02028846

1 1000

15,68012

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i = 15,68012194$$

χ^2^*

16,91897762

Так як $\chi^2 < \chi^2^*$ (χ^2^* - критичне значення критерію), то немає підстав заперечувати нормальний розподіл випадкових величин

**Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона
(при температурі 55°С)**

| $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | X_c | Частота | $m_i X_c$ | $m_i(X_c - X_{\text{сєр}})^2$ | X | $\Phi((X - X_{\text{сєр}})/s)$ | $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | P | $n P_x$ | $(n p_i - m_i) / n p_i$ |
|--------------------|---------------------|-----------|---------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------|----------|-------------------------|
| 54,94364 | 54,96164 | 54,95264 | 6 | 329,7158 | 0,0551916 | 54,96164 | 0,011189772 | 54,94364 | 54,96164 | 0,023894518 | 23,89452 | 0,000466 |
| 54,961641 | 54,979641 | 54,970641 | 24 | 1319,295 | 0,14567298 | 54,979641 | 0,035084291 | 54,961641 | 54,979641 | 0,055400098 | 55,4001 | 2,865654 |
| 54,979642 | 54,997642 | 54,988642 | 68 | 3739,228 | 0,24404438 | 54,997642 | 0,090484389 | 54,979642 | 54,997642 | 0,103107646 | 103,1076 | 0,460728 |
| 54,997643 | 55,015643 | 55,006643 | 110 | 6050,731 | 0,19317544 | 55,015643 | 0,193592035 | 54,997643 | 55,015643 | 0,154050659 | 154,0507 | 1,281533 |
| 55,015644 | 55,033644 | 55,024644 | 140 | 7703,45 | 0,08000506 | 55,033644 | 0,347642694 | 55,015644 | 55,033644 | 0,184775587 | 184,7756 | 0,09658 |
| 55,033645 | 55,051645 | 55,042645 | 189 | 10403,06 | 0,00658875 | 55,051645 | 0,532418281 | 55,033645 | 55,051645 | 0,17792676 | 177,9268 | 2,702139 |
| 55,051646 | 55,069646 | 55,060646 | 156 | 8589,461 | 0,0228274 | 55,069646 | 0,710345041 | 55,051646 | 55,069646 | 0,137547302 | 137,5473 | 0,302713 |
| 55,069647 | 55,087647 | 55,078647 | 144 | 7931,325 | 0,13044526 | 55,087647 | 0,847892343 | 55,069647 | 55,087647 | 0,085362414 | 85,36241 | 2,509991 |
| 55,087648 | 55,105648 | 55,096648 | 100 | 5509,665 | 0,23134822 | 55,105648 | 0,933254757 | 55,087648 | 55,105648 | 0,042527144 | 42,52714 | 0,143791 |
| 55,105649 | 55,123649 | 55,114649 | 45 | 2480,159 | 0,1966125 | 55,123649 | 0,975781902 | 55,105649 | 55,123649 | 0,017006841 | 17,00684 | 0,531615 |
| 55,12365 | 55,14165 | 55,13265 | 14 | 771,8571 | 0,09902092 | 55,14165 | 0,992788743 | 55,12365 | 55,14165 | 0,005458891 | 5,458891 | 0,389889 |
| 55,141651 | 55,159651 | 55,150651 | 4 | 220,6026 | 0,04169901 | 55,159651 | 0,998247634 | 55,141651 | 55,159651 | 0,001752366 | 1,752366 | 1,752366 |

Сума

n 1000 55048,55 1,44663151

1 1000 15,44446

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i = 15,44446075$$

$$\chi^2^* = 16,91897762$$

Так як $\chi^2 < \chi^2^*$ (χ^2^* - критичне значення критерію), то немає підстав заперечувати нормальний розподіл випадкових величин

**Оцінка результатів вимірювання на приналежність до нормального закону розподілу за критерієм згоди Пірсона
(при температурі 60°С)**

| $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | X_c | Частота | $m_i X_c$ | $m_i (X_c - X_{\text{сєр}})^2$ | X | $\Phi((X - X_{\text{сєр}})/s)$ | $X_{\text{нижнє}}$ | $X_{\text{верхнє}}$ | P | $n P x$ | $(n p_i - m_i) / n p_i$ |
|--------------------|---------------------|----------|---------|-----------|--------------------------------|----------|--------------------------------|--------------------|---------------------|-------------|----------|-------------------------|
| 60,99065 | 60,99265 | 60,99165 | 10 | 609,9165 | 0,00109395 | 60,99265 | 0,013140378 | 60,99065 | 60,99265 | 0,026747471 | 26,74747 | 0,84264 |
| 60,99265 | 60,99465 | 60,99365 | 22 | 1341,86 | 0,00157392 | 60,99465 | 0,039887849 | 60,99265 | 60,99465 | 0,060043946 | 60,04395 | 0,145531 |
| 60,99465 | 60,99665 | 60,99565 | 63 | 3842,726 | 0,00262683 | 60,99665 | 0,099931795 | 60,99465 | 60,99665 | 0,108495127 | 108,4951 | 6,97283 |
| 60,99665 | 60,99865 | 60,99765 | 136 | 8295,681 | 0,00270068 | 60,99865 | 0,208426922 | 60,99665 | 60,99865 | 0,157807651 | 157,8077 | 1,039467 |
| 60,99865 | 61,00065 | 60,99965 | 145 | 8844,95 | 0,00087408 | 61,00065 | 0,366234573 | 60,99865 | 61,00065 | 0,18477239 | 184,7724 | 0,416484 |
| 61,00065 | 61,00265 | 61,00165 | 176 | 10736,29 | 3,6313E-05 | 61,00265 | 0,551006963 | 61,00065 | 61,00265 | 0,174157991 | 174,158 | 0,382141 |
| 61,00265 | 61,00465 | 61,00365 | 166 | 10126,61 | 0,00039716 | 61,00465 | 0,725164954 | 61,00265 | 61,00465 | 0,13214318 | 132,1432 | 0,386134 |
| 61,00465 | 61,00665 | 61,00565 | 125 | 7625,707 | 0,00157334 | 61,00665 | 0,857308134 | 61,00465 | 61,00665 | 0,080710579 | 80,71058 | 2,188173 |
| 61,00665 | 61,00865 | 61,00765 | 94 | 5734,72 | 0,00289415 | 61,00865 | 0,938018713 | 61,00665 | 61,00865 | 0,039680923 | 39,68092 | 0,713002 |
| 61,00865 | 61,01065 | 61,00965 | 45 | 2745,435 | 0,00256496 | 61,01065 | 0,977699636 | 61,00865 | 61,01065 | 0,015702623 | 15,70262 | 0,031439 |
| 61,01066 | 61,01266 | 61,01166 | 15 | 915,1749 | 0,00136826 | 61,01266 | 0,993402259 | 61,01066 | 61,01266 | 0,005001131 | 5,001131 | 0,800724 |
| 61,01266 | 61,01466 | 61,01366 | 3 | 183,041 | 0,00040033 | 61,01466 | 0,99840339 | 61,01266 | 61,01466 | 0,00159661 | 1,59661 | 1,59661 |

Сума

n 1000 61002,11 0,01810397

1 1000 16,26568

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (n p_i - m_i)^2 / n p_i = 16,26568451$$

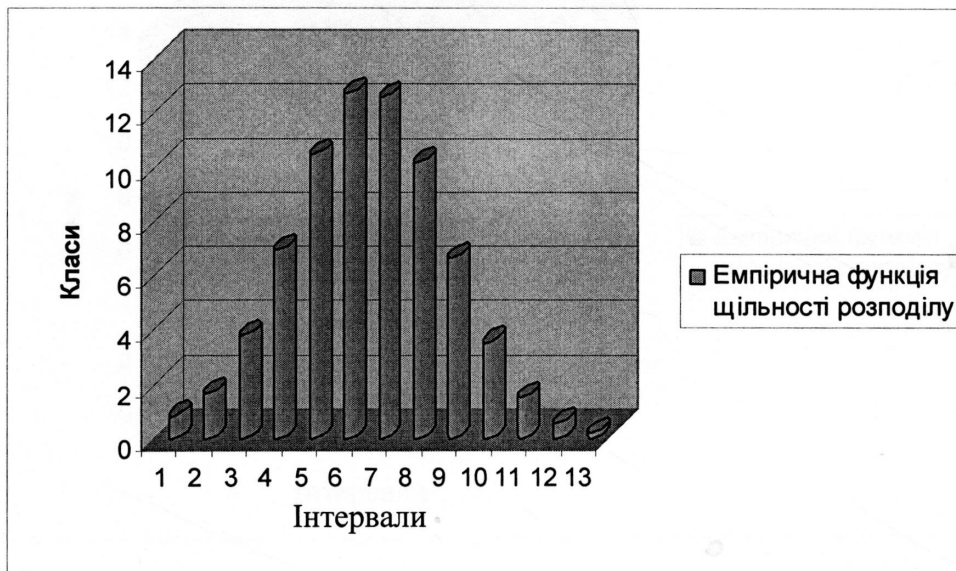
χ^2^*

16,91897762

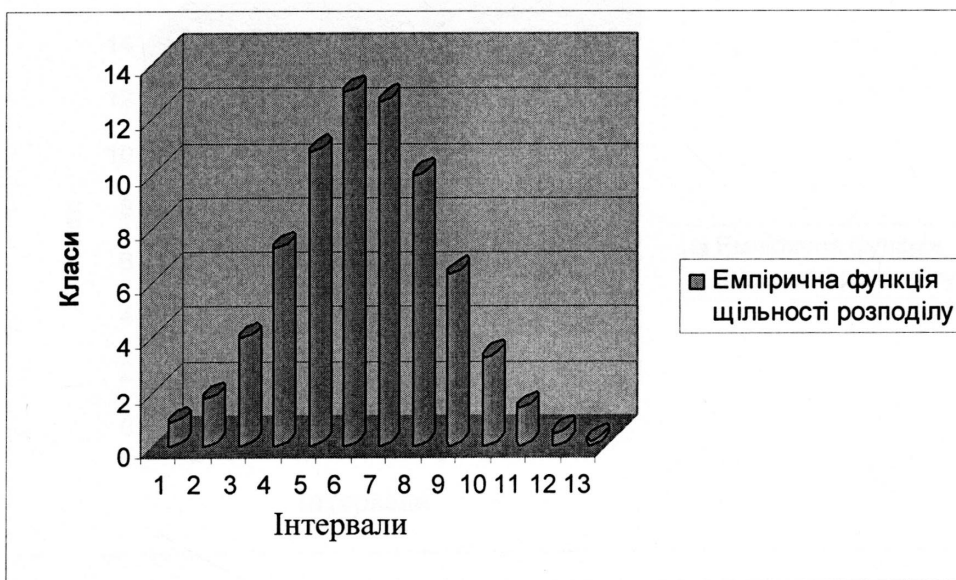
Так як $\chi^2 < \chi^2^*$ (χ^2^* - критичне значення критерію), то немає підстав заперечувати нормальний розподіл випадкових величин

Додаток 3

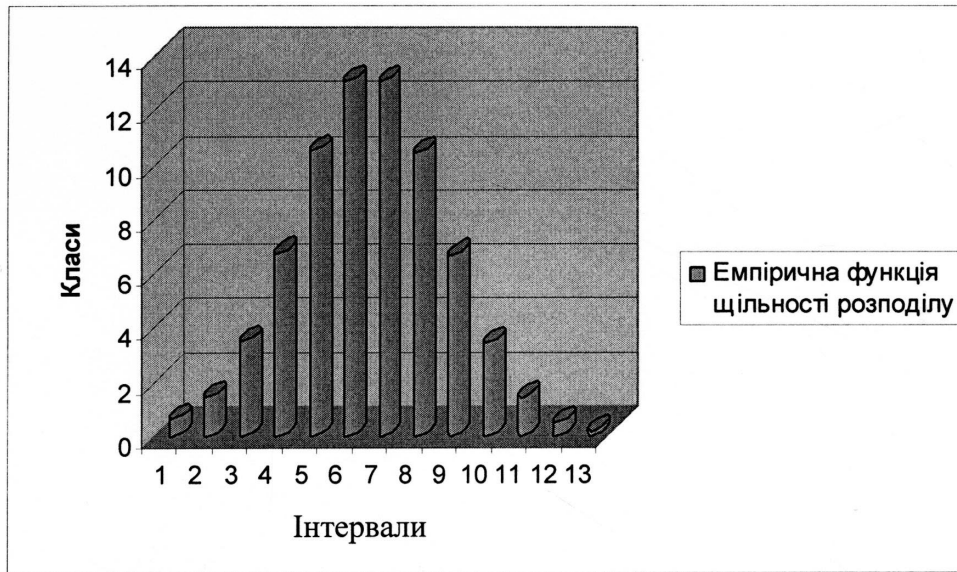
Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 0°C



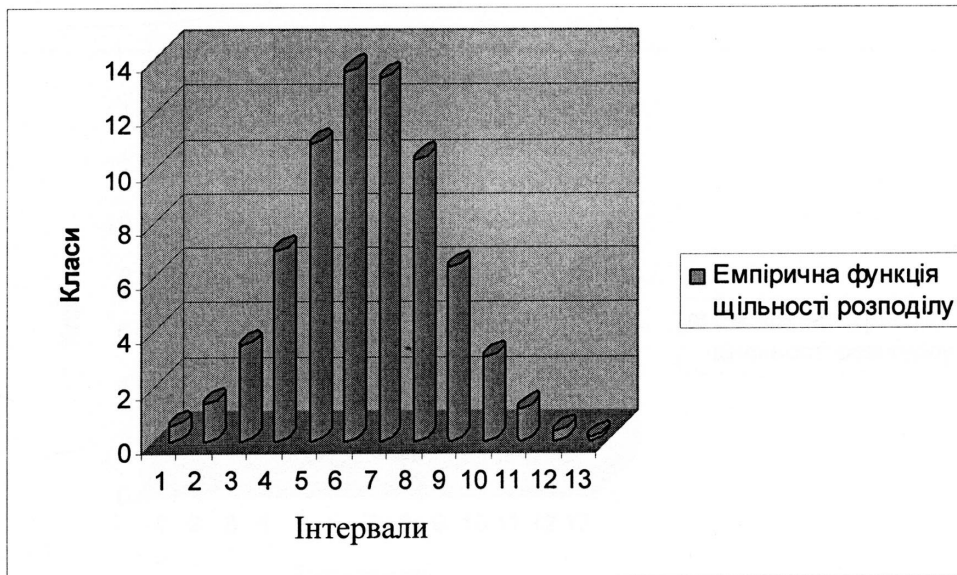
Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 5°C



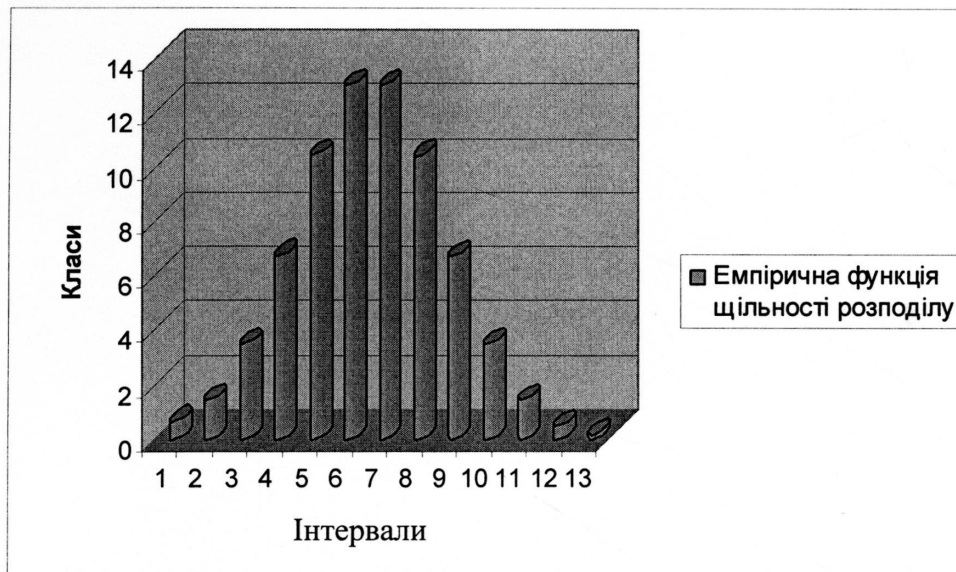
Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 10⁰С



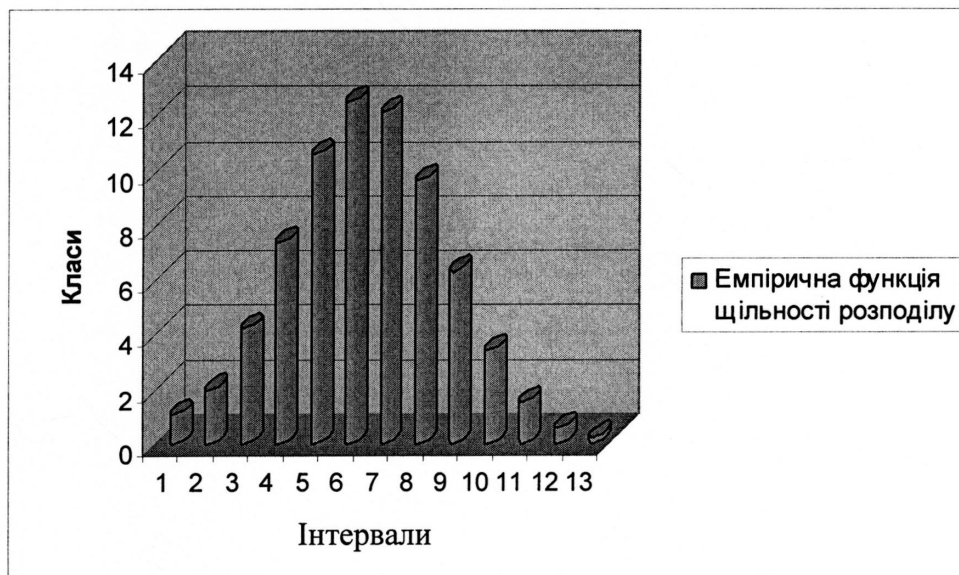
Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 15⁰С



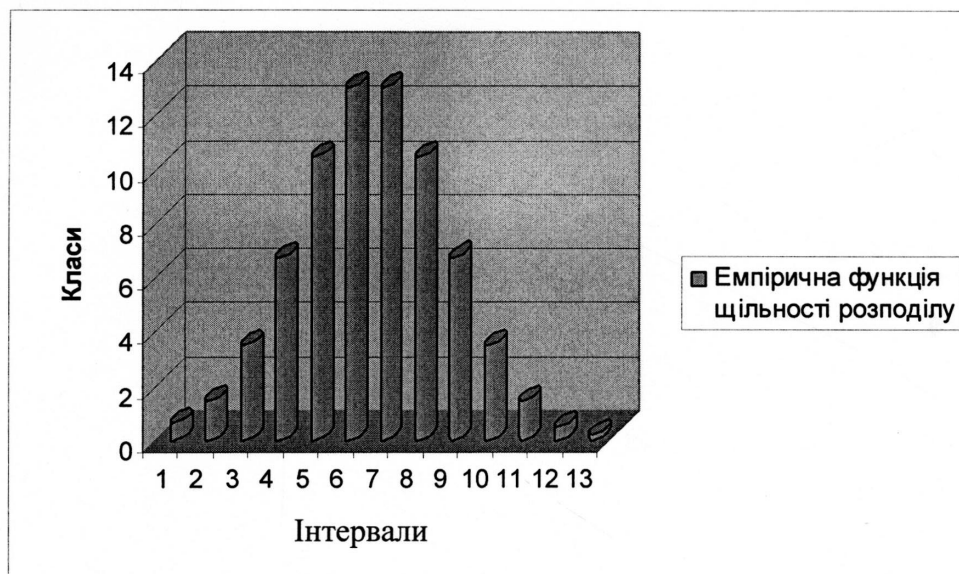
Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 25⁰С



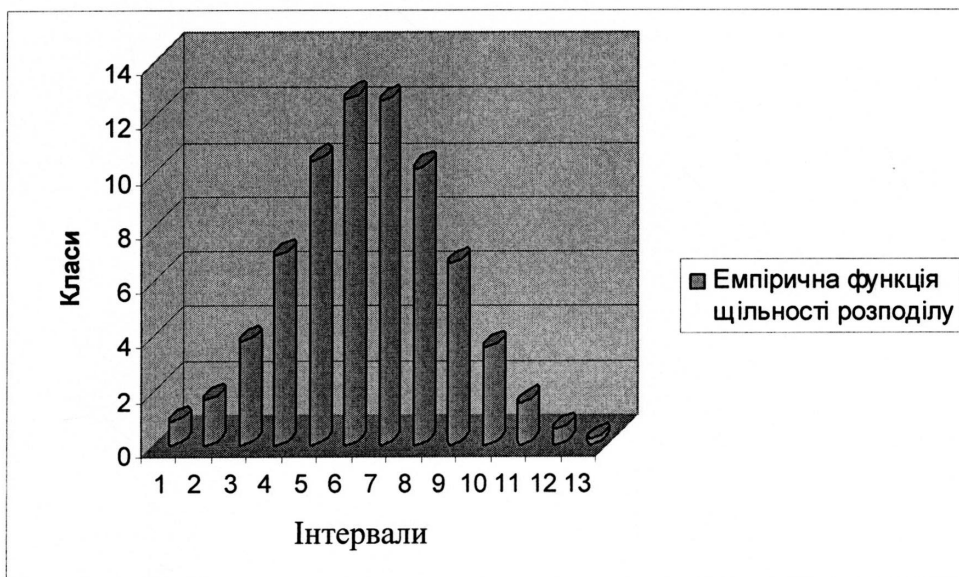
Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 30⁰С



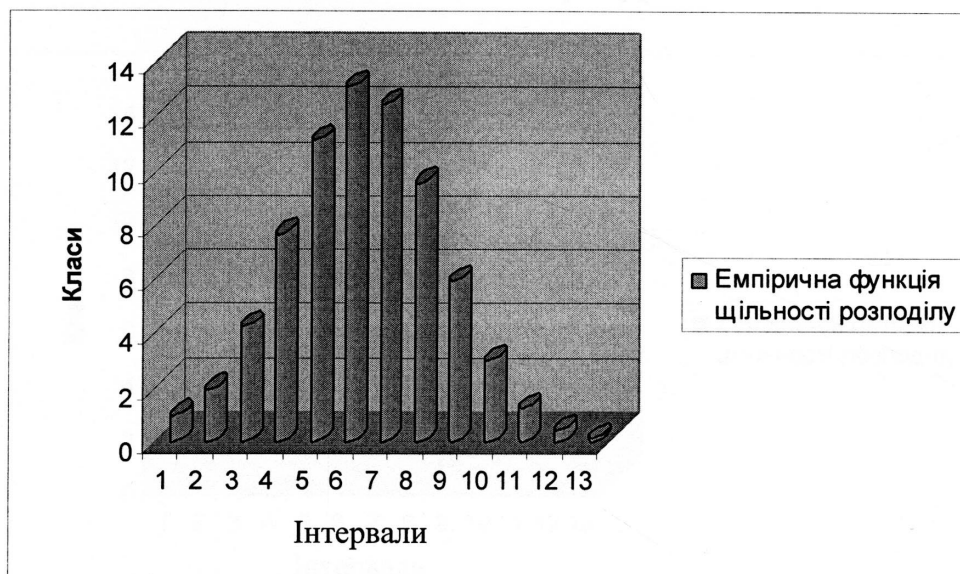
Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 35⁰С



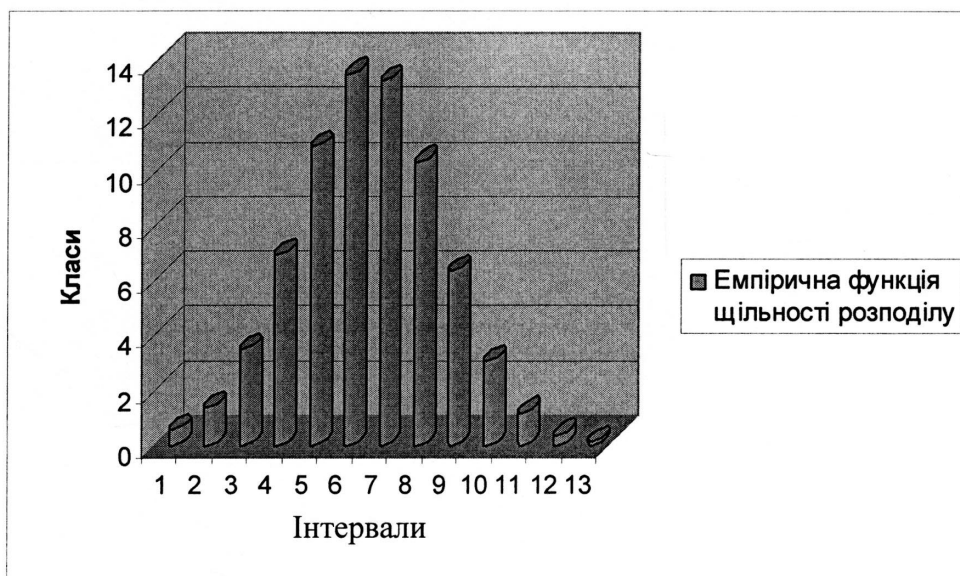
Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 40⁰С



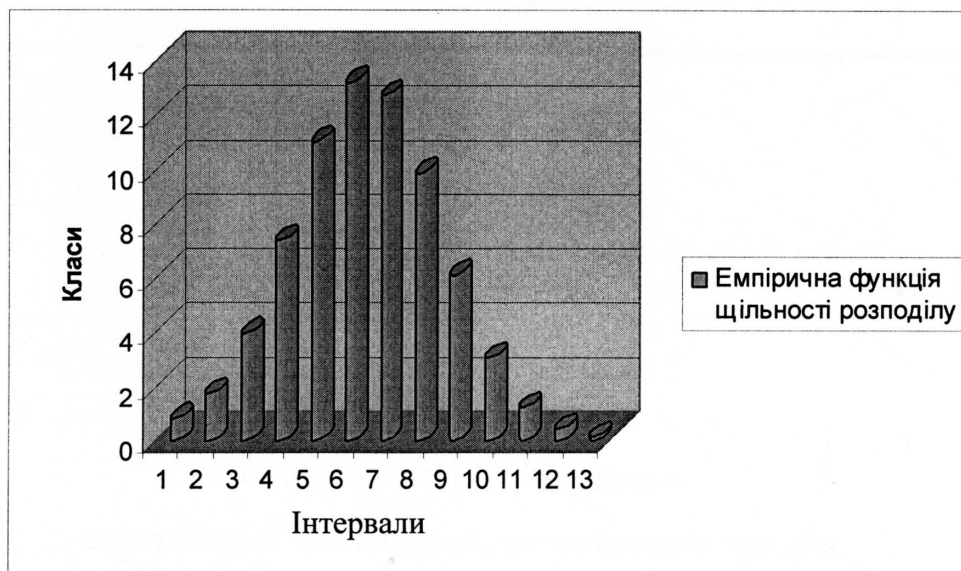
Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 45⁰С



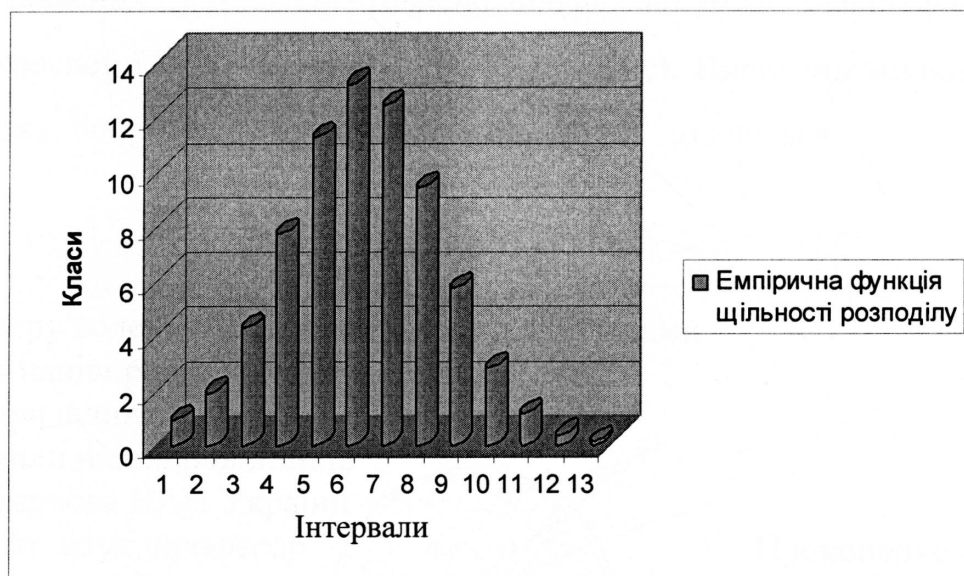
Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 50⁰С



Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 55⁰С



Гістограма емпіричної функції щільності розподілу результатів вимірювання температури 60⁰С



№ 31207/11-1796

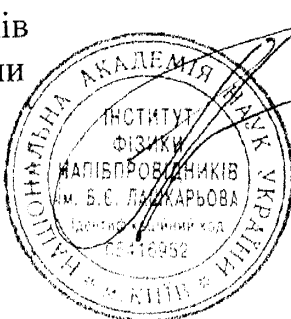
«04» 10 2007 р.

**Заключення
про проведення досліджень
внутрішньої мікроструктури металевих зразків**

Для досліджень представлено три зразки сталевих брусків (сталь СТ3) розміром 20x8x15 мм.

З представлених зразків виготовлено шліфи, які були досліджені методом оптичної мікроскопії (мікроскоп NU-2E, Карл Цейс). Виявлено мікротріщини в кожному зразку. Зображення мікротріщин на шліфах додаються.

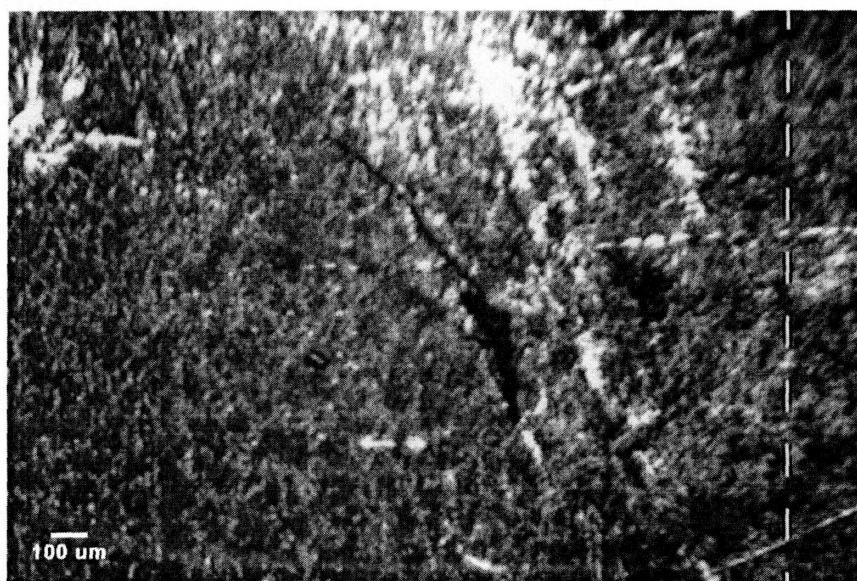
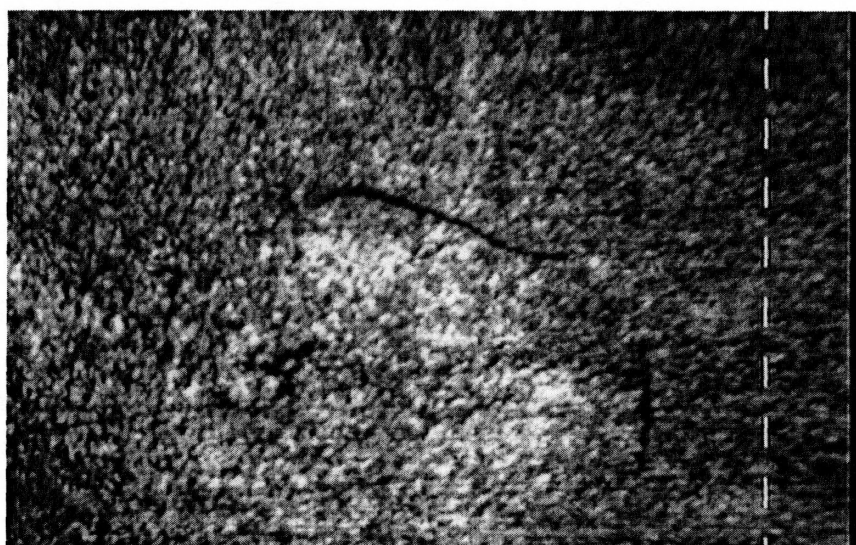
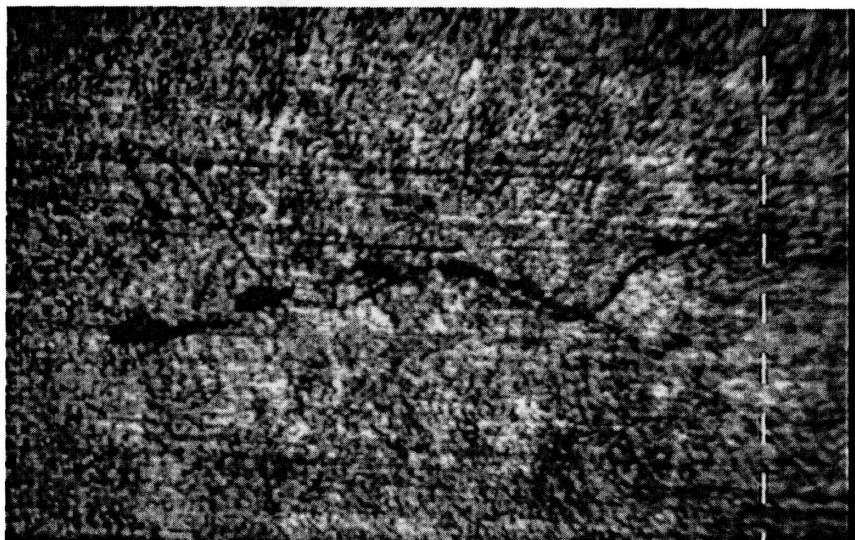
Керівник центру колективного користування приладами
«Діагностика напівпровідникових матеріалів,
структур та приладних систем»
Інституту фізики напівпровідників
ім. В.С. Лашкарьова НАН України
доктор фіз.-мат. наук, професор



Прокопенко І.В.

Додаток К
Мікрошліфи зразків виготовлених зі сталі Ст20



Мікрошліфи зразків виготовлених зі сталі Ст45

Додаток Л

Модуль програми з обчислення критичних параметрів руйнування

```
unit Unit1;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,  
Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, TeeProcs, TeEngine, Chart, Series, BubbleCh;
```

```
type
```

```
TForm1 = class(TForm)
```

```
Label1: TLabel;
```

```
Button1: TButton;
```

```
Edit1: TEdit;
```

```
Label2: TLabel;
```

```
Label3: TLabel;
```

```
Edit2: TEdit;
```

```
Label4: TLabel;
```

```
Edit3: TEdit;
```

```
Label5: TLabel;
```

```
Edit4: TEdit;
```

```
Label6: TLabel;
```

```
Edit5: TEdit;
```

```
Chart1: TChart;
```

```
Button6: TButton;
```

```
Series1: TLineSeries;
```

```
Label7: TLabel;
```

```
Edit6: TEdit;
```

```
Label13: TLabel;
```

```
Label8: TLabel;
```

```
Label9: TLabel;
```

```
Label10: TLabel;
```

```
Edit7: TEdit;
```

```
Edit8: TEdit;
```

```
Edit9: TEdit;
```

```
Label11: TLabel;
```

```
Label12: TLabel;
```

```
Edit10: TEdit;
```

```
Edit11: TEdit;
```

```
Procedure Button1Click(Sender: TObject);
```

```

    procedure Button5Click(Sender: TObject);
    procedure Button6Click(Sender: TObject);
private
    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form1: TForm1;

implementation

{$R *.dfm}
Procedure Delay (Seconds: real);
Var
    Later: TDateTime;
Begin
    Later := Now + (Seconds / (24.0 * 60.0 * 60.0));
    While Now < Later do Application.ProcessMessages;
end;

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
Label2.Caption:='Wdc - критична густина енергії;'+#13+
    'Wvc - ротаційна нестійкість' +#13+
    'v - коефіцієнт Пуасона; '

end;

procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
begin
Label2.Caption:= '    Фрактальна розмірність'+#13+
    '    диспативної структури .'

end;

procedure TForm1.Button6Click(Sender: TObject);
var e,kq,Rcmax,ei,d,z,x,f,j,h,p,delta,kr,w,sigma,n,nmax,nmin,kc,y,roc:real;
    WdcWvc,WdWv,v,r,rmax,i:real;
begin

```

```

WdWv:=StrToFloat(edit1.Text); //Критична густина енергії / ротаційна
нестійкість в локальному об'ємі
v:=StrToFloat(edit2.Text); //коефіцієнт Пуасона
delta:=StrToFloat(edit3.Text); //функція самоподібності (постійна
руйнування)
e:=StrToFloat(edit4.Text);
kr:=StrToFloat(edit5.Text); //розмірна стала, що контролює максимальний
розмір автотрещини зони передруйнування
kc:=StrToFloat(edit6.Text); //критичний коефіцієнт інтенсивності
напружень у точці біфуркації, що відповідає або руйнуванню або пластичній
нестабільності
w:=StrToFloat(edit7.Text); //критична густина енергії деформації, яка
дозволяє контролювати механічні властивості на макрорівні у квазіаморфній
фазі
sigma:=StrToFloat(edit8.Text); // опір пластичній деформації
nmax:=StrToFloat(edit9.Text);
nmin:=StrToFloat(edit10.Text);
n:=StrToFloat(edit11.Text);

```

```

WdWv:=2*delta*(1+v); j:=1;
ei:= e*kr/((1+v)*(1-2*v)); //пружні константи
p:=(kc*sigma)*(kc*sigma)/w; //критичні параметри руйнування
i:=ei/p; //коефіцієнт масштабу для переходу від параметрів
// руйнування на мікрорівні до параметрів
//руйнування на макрорівні

```

```

kq:=kr*(1/sqrt(delta))*(nmax-n)/(nmax-nmin); //значення коефіцієнта KI в точці
біфуркації, що відповідає або руйнуванню або пластичній нестабільності

```

//nmax, nmin - параметри, що є характеристикою, пов'язаною з динамічною структурою, які контролюють швидкість руйнування під час руху берегів тріщини

```

Rcmax:=sqrt(kr/sigma)*(1/2*3.1415); //Максимальний розмір автотрещини
зони передруйнування

```

```

roc:= (((1+v)*(1-2*v)*sqrt(kr))/(2*3.1415*w*e*delta)) * sqrt((nmax-n)/(nmax-2));
// Критичний розмір мікротріщини, що здатна самоподібно поширюватись

```

```

Rcmax:=round(Rcmax*1000)/1000;
kq:=round(kq*1000)/1000;
i:=round(i*1000000)/1000000;
WdWv:= round(WdWv*1000)/1000;

```

```

if WdWv<WdcWvc then
begin
repeat
label2.Caption:= 'За даним кристалічна фаза є'+#13+
                'стійкою, тобто процесу руйнування '+#13+
                'немає.';
if j=1 then
label2.font.Color:=clred
else
label2.font.color:=clblue;
j:=-j;

h:=h+1;
Delay(0.35);

until h>20;
end
else
begin
Label2.Caption:='Wd/Wv= '+ floatostr(WdWv)+' критична густина енергії'
+#13+
                'одного і того ж рівня ;'+#13+
                'i(сy)= '+floatostr(i)+' коефіцієнт масштабу для переходу від
параметрів '+#13+
                'руйнування на мікрорівні до параметрів руйнування на
макрорівні'+#13+
                'K= '+floatostr(kq)+' значення коефіцієнта KI в точці біфуркації, що
відповідає '+#13+
                'або руйнуванню або пластичній нестабільності;' +#13+
                'r= '+floatostr(Rcmax)+' максимальний розмір автотодельності
зони передруйнування';

Chart1.BottomAxis.Minimum:=-50;
Chart1.BottomAxis.Maximum:=50;
y:=0;x:=0; f:=0;
Series1.Clear;
//Series2.Clear;
repeat
randomize;
f:=f+1;

```

```
Series1.AddXY(x,y);
z:=y;
y:=random(40);
if f>10 then
y:=(y/10)+z
else
begin

y:=(y/10)+z;
//z:=20;
end;
// Series2.AddXY(d,y);
x:=x+1; Delay(0.1);
until x>20 End;
end;

end.
```

Додаток М

Матеріали про впровадження результатів дисертаційної роботи

"Затверджую"

Проректор з наукової
роботи ІФНТУНГ,
докт.техн.наук, проф.
Карпаш О.М.
"01" 03 2007р.

Довідка

про впровадження дисертаційної роботи Габльовської Н.Я. "Вдосконалення методу контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях" у рамках держбюджетних робіт

Довідка видана про те, що основні результати дисертаційної роботи Габльовської Н.Я. "Вдосконалення методу контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях":

термодинамічна модель, що дозволяє оцінювати зміну температури на поверхні металічної конструкції в момент зародження мікротріщини;

розробка засобу для вимірювання температури, який дозволяє контролювати зміну температури на поверхні металоконструкції у діапазоні від 0 до 60⁰С;

система контролю зародження тріщин у напружено-деформованих конструкціях;

математична модель для встановлення універсального взаємозв'язку між мікро- та макрохарактеристиками металів під час переходу дисипативної системи через точку біфуркації;

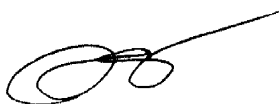
- використані при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи ІФНТУНГ: "Метрологія та вимірювальна техніка в нафтовій галузі та приладобудуванні" номер державної реєстрації 0101U001664.

Керівник ДНДР, проф.



Чеховський С.А.

Директор НДІНГТ, проф.



Івасів В.М.

“Затверджую”

Ректор Івано-Франківського
Національного технічного
університету нафти і газу
проф. Крижанівський С.І.

“27”



Довідка

*про впровадження результатів дисертаційної роботи Габльовської Н.Я.
“Вдосконалення методу контролю розвитку мікротріщин у напружено-
деформованих металічних конструкціях” у навчальний процес ІФНТУНГ*

Довідка видана про те, що основні результати дисертаційної роботи Габльовської Н.Я. “Вдосконалення методу контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях”: метод контролю зародження та розвитку тріщин, термодинамічна модель та її програмна реалізація на ЕОМ впроваджені в навчальний процес ІФНТУНГ 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” для підготовки спеціалістів за спеціальністю “Метрологія та вимірювальна техніка”.

Завідувач кафедри
інформаційно-вимірювальної
техніки, проф., к.т.н.

Чеховський С.А.

Завідувач кафедри
електротехніки, доцент, к.т.н.

Чорноус В.М.



11.05.2007 № 25/08-1643

На № _____ від _____

АКТ

про технічний рівень наукової розробки "Вдосконалення методу контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях"

Адміністрація ВАТ "Івано - Франківський арматурний завод" вважає доцільним рекомендувати метод та прилад контролю зародження та розвитку тріщин на підприємствах, що спеціалізуються на проведенні неруйнівного контролю та технічної діагностики дефектів у металоконструкціях, що перебувають під дією навантажень.

Система контролю та технічної діагностики дефектів у металоконструкціях, що перебувають під дією навантажень пройшла промислові випробування в лабораторії механічних вимірювань ВАТ "Івано - Франківський арматурний завод" і рекомендована до впровадження.

Головний інженер
ВАТ "ІФАЗ"

Я.І.Понюк

Виконавець

Начальник ЦЗЛ

М.Р.Гаврих тел. 3-13-58

ВИРОБНИЧО-КОМЕРЦІЙНА ФІРМА “ІНТЕМ”

Україна, 76019, м.Івано-Франківськ, а/с 614, вул.Заклинських, 8,
тел/факс:(0342)77-73-49, тел:4-32-15.4-02-23,77-73-48,77-73-50,
р/р 26005210 в ВАТ“Електронбанк”, МФО 336428, код 20545919,
ПІН 205459109155, св. 12877064 E-mail intem@itc.if.ua

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Габльовської Н.Я.
“Вдосконалення методу контролю розвитку мікротріщин у напружено-
деформованих металічних конструкціях “

На виробничо-комерційній фірмі “Інте́м” впроваджено у виробництво дослідну партію приладу для контролю зміни температури на поверхні об’єкта контролю, розробленого Габльовською Н.Я. в межах її дисертаційної роботи . Під час проведення випробувань одержані результати, які підтверджують високу швидкодію, низьку інерційність та високу точність вимірювань.

Директор ВКФ “Інте́м”



Мако́йда В.С.