

4. Афанасев, В. А. Оборудование для импульсной термообработки полупроводниковых материалов [Текст] / В. А. Афанасев, М. П. Духвський, Г. А. Красов. - Электроника СВЧ, 1984. - 56-58с.
5. Окамото, Т. Устройства ионной имплантации [Текст] / Т. Окамото. - Саймицу кикай, 1985. - 1322-1325с.
6. Черилов, А. В. Исследование электрофизических характеристик ионно-легированных слоев GaAs [Текст] / А. В. Черилов - Электронная техника, 1984. -8-12с.
7. Данилов, Ю. А. Электрофизические свойства слоев GaAs, полученных имплантацией [Текст] / Ю. А. Данилов, П. В. Павлов, Е. А. Питиримова. - ФТП, 1984. - 1673-1678с.
8. Риз, Дж. Полуизолирующие соединения  $A^{III}B^V$  [Текст] / Дж. Риз. - М.: Металлургия, 1984. - 410с.
9. Новосядлий, С. П. Суб - наномікрона технологія структур ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий. - Івано-Франківськ Місто НВ, 2010. - 456с.
10. Новосядлий, С. П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий. - Івано-Франківськ: Сімка, 2003. - 52-54с.

*Приведено схему розробленої експериментальної установки для реалізації активного термографічного методу дефектоскопії твердих тіл на основі використання енергії циклічних напружень і енергії інфрачервоного випромінювання. Експериментально показана можливість виявлення сучасними тепловізійними засобами контролю термопроявлення мікроструктурних неоднорідностей і дефектів в металах при циклічних навантаженнях зразків*

*Ключові слова: ІЧ-радіометрія, дефектоскопія твердих тіл, циклічні навантаження*

*Приведена схема разработанной экспериментальной установки для реализации активного термографического метода дефектоскопии твердых тел на основе использования энергии циклических напряжений и энергии инфракрасного излучения. Экспериментально показана возможность выявления современными тепловизионными средствами контроля термопроявления микроструктурных неоднородностей и дефектов в металлах при циклических нагрузках образцов*

*Ключевые слова: ИК-радиометрия, дефектоскопия твердых тел, циклические нагрузки*

УДК 681.2:620.1

## УСТАНОВКА АКТИВАЦІЇ МЕТАЛІВ ЦИКЛІЧНИМИ НАПРУЖЕННЯМИ ПРИ ТЕРМОГРАФІЧНІЙ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

**М. І. Базалєєв**

Кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник\*

**Б. Б. Бандурян**

Кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник\*

**В. В. Брюховецький**

Доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, заступник директора ІЕРТ НАН України\*

**В. Ф. Клепиков**

Доктор фізико-математичних наук, професор, член-коресподент НАН України, директор ІЕРТ НАН України\*

**В. В. Литвиненко**

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора ІЕРТ НАН України\*

**Є. М. Прохоренко**

Кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник\*

E-mail: fort-58@mail.ru

\*Інститут електрофізики і

радіаційних технологій НАН України

вул. Гуданова, 13, м. Харків, Україна, 61002

### 1. Вступ

Основу методики тепловізійного контролю становлять технології дистанційної інфрачервоної радіометрії контролю [1], які базуються на реєстрації потоку інфрачервоного випромінювання з поверхні об'єктів

контролю і наступному аналізі їх термозображень, що відображає їхню структуру, є інформаційним полем, за допомогою якого виявляються приховані дефекти і дефектоутворюючі зони, проводиться класифікація дефектів контролю [2, 3]. Наявність дефекту при такій діагностиці відображається величиною аномальної

зміни радіаційної температури і характером її розподілу на поверхні в порівнянні з фоновими, еталонними або базовими зонами контролю [4, 5].

Інформаційне поле (поле поверхневої радіаційної температури) формується тепловими потоками, що проходять через матеріал (середовище) об'єкта контролю до поверхні його випромінювання. Трансформація внутрішніх теплових і температурних полів у поле поверхневої радіаційної температури об'єкта контролю відбувається в умовах впливу на об'єкт зовнішніх збурюючих факторів

Можливості тепловізійного контролю істотно розширюються при використанні вібротепловізійного неруйнівного контролю, заснованого на використанні енергії вібрації як джерела теплової активації [6 - 10]. Дисипація енергії акустичних хвиль на дефектах (дисипативних структурах) приводить до перерозподілу існуючих в об'єкті контролю теплових потоків, локальному збільшенню температури в зоні дефекту, їхньому відображенню в полі інфрачервоного випромінювання. Формування температурних аномалій на дефектах (елементах конструкції технологічного устаткування) внаслідок інтенсивної трансформації енергії вібрації в теплову енергію можна розглядати як альтернативу теплової активації у методі теплового контролю. Процес проходження пружної хвилі в матеріалі визначається фізико-механічними властивостями середовища. Амплітуда, частота і тривалість дії пружних хвиль вібрації (акустичних хвиль) - це основні фактори (параметри), які визначають ефективність процесу виявлення прихованих тріщин тепловізійним методом.

## 2. Опис експериментальної установки термодинамічної тепловізійної дефектоскопії

На рис. 1 представлена схема експериментальної установки, яка реалізує активний термографічний метод дефектоскопії твердих тіл на основі використання енергії циклічних напружень і енергії інфрачервоного випромінювання від широкоформатного випромінювача - абсолютно чорного тіла (АЧТ). Конструктивною особливістю установки є можливість як роздільної, так і одночасної активації зразків різними за фізичною природою енергетичними потоками, що дозволяє використовувати кореляційні методи обробки інформаційних полів термопроявлення дефектів, підвищує ефективність їх ідентифікації.

Розглянемо особливості термодинамічної тепловізійної дефектоскопії на основі використання енергії циклічних напружень. На рис. 2 представлено два варіанти навантаження зразка циклічними напруженнями.

Конструкції силових модулів, які відповідають вказаним вище варіантам, представлено на рис. 3, 4.

Принцип роботи силового модуля експериментальної установки для варіанта навантаження зразка циклічними напруженнями, який створюється штоком вібратора (рис. 2. 3) полягає в наступному. Зразок/об'єкт контролю (7) закріплений між рухливою (5) і нерухомою (8) опорами. Циклічні напруження на зразок передаються на рухливу опору (опора закріплена на пружній

сталевій консолі (3) за допомогою пружинної шайби (2), що забезпечує узгодження амплітуд коливання штока вібратора  $A_B$  (13) і деформації зразка  $\Delta L_y$ . Величина сили стиску пружини (навантаження на зразок) регулюється притискним пристроєм (1) штока вібратора (13), що приводиться у віброуючий рух рухливою частиною сердечника електромагніта (якір електромагніта, 14), і зміною напруги живлення електромагніта. Твердість (забезпечується пружним гумовометалічним елементом (12) і маса рухливої частини вібратора (1,13,14) обрані виходячи з можливості забезпечення власної резонансної частоти коливання з подвоєною частотою мережі електроживлення (100 Гц).

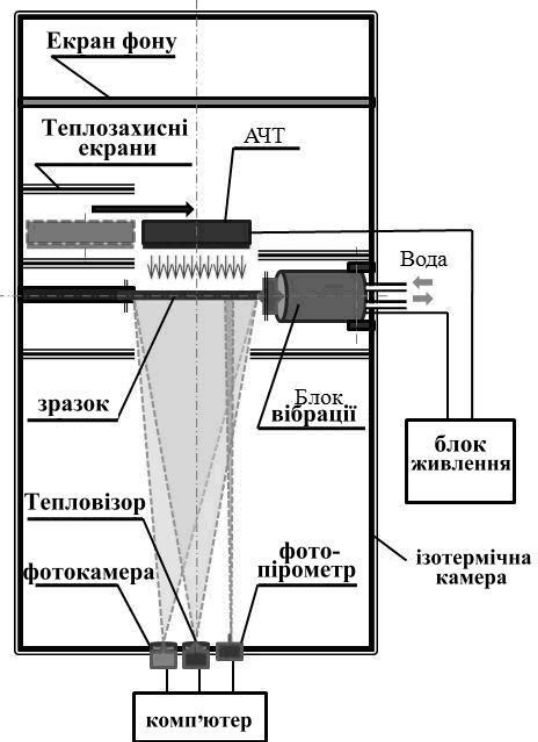


Рис. 1. Схема експериментальної установки

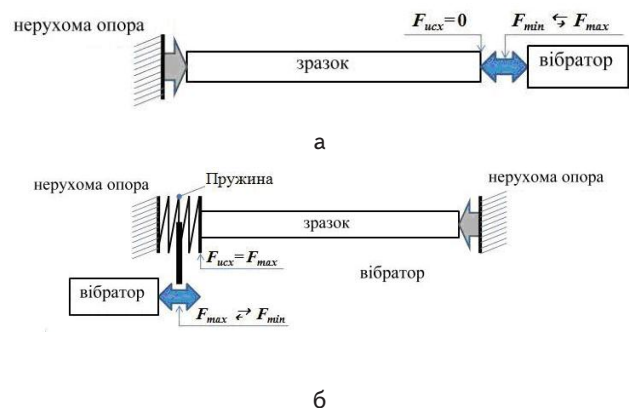


Рис. 2. Варіанти силового навантаження зразка: а – зразок навантажується зусиллям штоку вібратора; б – зразок навантажується силою зжатої пружини, величина якої циклічно змінюється (зменшується) при втягуванні штока вібратора

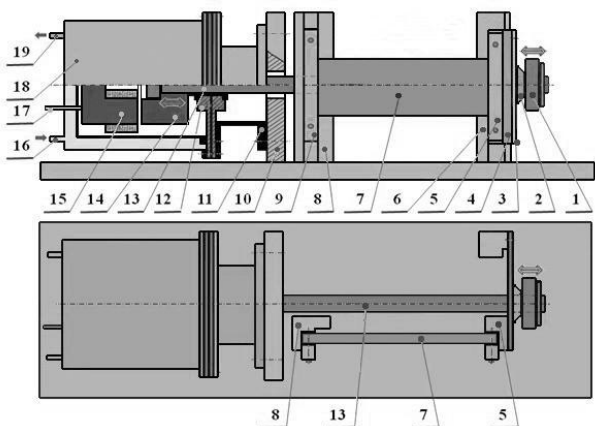


Рис. 3. Установка для активации твердых тел циклическими напряжениями при термодинамической тепловизионной дефектоскопии: 1 - притисный пристрой штока вибратора; 2 - пружинная шайба формовача циклического навантаження; 3 - пружинная консоль рухливої опори зразка; 4 - рухлива опора зразка; 5, 9 - елемент кріплення зразка до опори; 6 - кріпильний кронштейн підстави установки; 7 - зразок (об'єкт контролю); 8 - нерухома опора зразка (кронштейн підстави установки); 10 - кронштейн кріплення блоку вибратора; 11 - корпусні деталі вибратора; 12 - пружинний гумоометалічний елемент; 13 - шток вибратора; 14 - якорь електромагніта; 15 - електромагніт; 16, 19 - штуцера системи водяного охолодження блоку вибратора; 17 - введення живлення обмоток електромагніта; 18 - корпус системи водяного охолодження вибратора

На рис. 5, а, б дана схема формувача циклічного навантаження.

Умова узгодження амплітуди коливань  $A_{вш}$  штока вибратора з деформацією  $\Delta L_y$  зразка під дією навантаження  $f$ , сформованої силою пружності  $F_y$  формувача циклічного навантаження (рис. 5), визначається виходячи з конструктивних і енергетичних співвідношень параметрів використовуваної установки, умов стабільної роботи вибратора на резонансних частотах:  $A_{вш} = A_{в} + \Delta L_y$ ;  $A_{в} = L_{пн} - L_{п}$ ;  $\Delta L_y = L_o - L_{он}$ ;  $\Delta L_y \ll A_{вш}$ ;  $F_y = f$ , де  $L_o$  і  $L_{он}$  - довжина зразка при дії мінімального й максимального навантаження, сформованої силами пружності пружини при її мінімальному ( $L_{п}$ ) і максимальному ( $L_o$ ) розмірі стиску відповідно. При однорідній структурі зразка, у межах малих напружень і деформацій, зв'язок між напругою  $f$  і деформацій  $\Delta L_y$  визначається законом Гука:

$$f = E\Delta L_y \tag{1}$$

де  $E$  - модуль (коефіцієнт) пружності матеріалу зразка.

Як витікає з формули Кельвіна, термопружний ефект проявляється в підвищенні температури при стискуванні твердих тіл, величина якої ( $\Delta T$ ) при невеликих механічних навантаженнях визначається як

$$\Delta T = -\frac{\alpha T}{C} \sigma \tag{2}$$

де  $T$  - температура тіла,  $C$  - теплоємність;  $\alpha$  - лінійний коефіцієнт термічного розширення;  $\sigma$  - навантаження (у нашому випадку  $\sigma = f$ ).

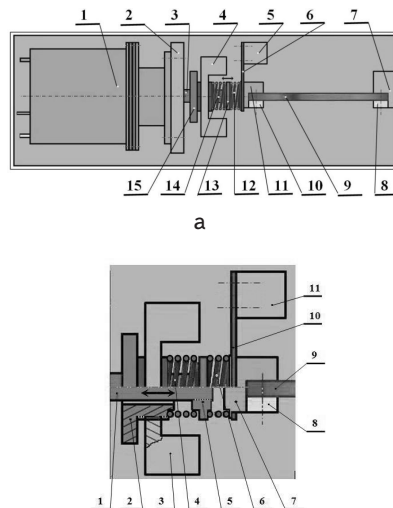


Рис.4. Схема силового модулю для активации твердых тел циклическими напряжениями, які створюються стиснутою пружиною. а - схема модуля: 1 - блок вибратора; 2, 4, 5 - кронштейни кріплення основи установки; 3 - шток вібратора; 6 - пружинна консоль рухомої опори зразка; 7 - нерухома опора зразка; 8, 10 - елементи кріплення зразка до опори; 11 - рухома опора зразка; 12 - пружинний провідник циклічного навантаження; 13 - опірня шайба; 14 - силова пружина (задає рівень навантаження зразка); 15 - гайка регулятора навантаження. б - пристрій формувача циклічного навантаження: 1 - шток вибратора; 2 - гайка регулятора навантаження; 3 - кронштейн основи установки; 4 - силова пружина; 5 - опірня шайба; 6 - пружинний провідник циклічного навантаження; 7 - рухома опора зразка; 8 - елемент кріплення зразка до рухомої опори; 9 - зразок; 10 - пружинна консоль рухомої опори зразка; 11 - кронштейн основи установки

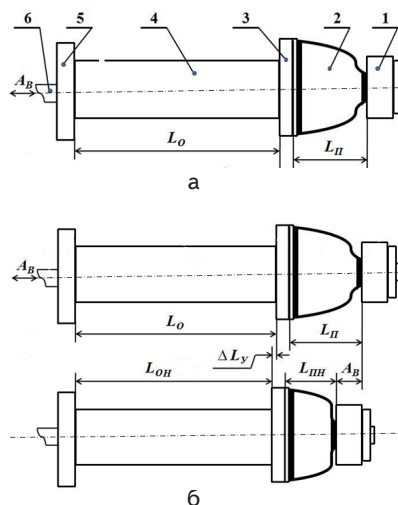


Рис. 5. Принцип роботи формувача циклічного навантаження, а - початкова модель, б - удосконалена модель: 1 - притисний пристрой штока вибратора; 2 - пружинна шайба формувача циклічного навантаження; 3 - рухлива опора зразка; 4 - зразок (об'єкт контролю); 5 - нерухома опора зразка; 6 - шток вибратора

Теплова активація зразків здійснюється широкоформатним інфрачервоним випромінювачем, рис. 6, характеристики ІЧ-випромінювання якого наближені до АЧТ. Робочий діапазон зміни температури АЧТ регулюється в межах 50 -300°С. Система позиціонування АЧТ забезпечує необхідну тривалість (експозицію) ІЧ-опромінення об'єкта дослідження.

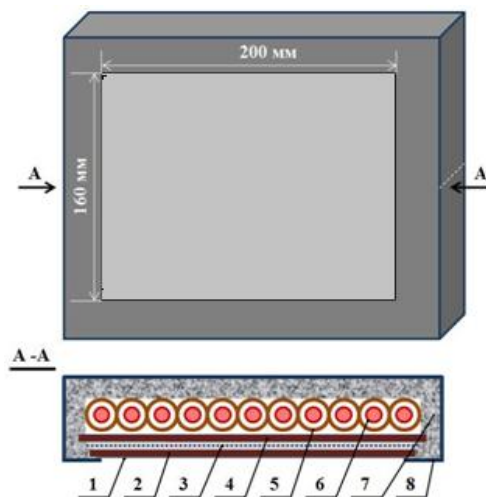


Рис. 6. Широкоформатний інфрачервоний випромінювач (АЧТ) для теплової активації зразків при термографічній дефектоскопії: 1 – шар лакофарбового покриття, що забезпечує значення коефіцієнта випромінювання АЧТ на рівні 0,97±0,1; 2 – зовнішній ізотермічний випромінювач (лист міді товщиною 6 мм); 3 – сітка зі скловолоконної тканини; 4 – внутрішній термовирівнюючий випромінювач (лист міді товщиною 6 мм); 5 – керамічна трубка електро-нагрівального елемента; 6 – ніхромова спіраль електро-нагрівача потужністю 1 Квт; 7 – термоізолятор (азбест, склотканина); 8 – корпус широкоформатного випромінювача (нержавіюча сталь Х18Н12Т

### 3. Експериментальні дослідження

Дослідження процесів поглинання енергії пружних хвиль на різних дефектних структурах, штучно створених у матеріалі випробуваних зразків, і їх термопроявлення в полі інфрачервоного випромінювання проводилося на описаній вище (рис. 1) установці з використанням генератора циклічних напружень УЗДН-22. Термографічна зйомка здійснювалась за допомогою тепловізора Land Ti814/LIPS814 (просторовий дозвіл 1,3 мрад, температурна чутливість 0,08 °С у спектральному діапазоні 8-14 мкм, приймач інфрачервоного випромінювання - неохолоджувана матриця 240×320 пікселів) і пірометра Fluke 576.

Схема теплової моделі процесу поглинання енергії пружних хвиль на поперечних дефектних структурах зразків з конструкційних матеріалів представлена на рис. 7.

На рис. 8, б показано термограму (2) поздовжнього перерізу зразка, на якій після проведення спеціальної обробки термозображення (1), знятого на 36 секунд дії циклічного навантаження, явно проявляється термоаномалія дефектної структури, що перевищує

коливання фонові температури на 0,8°С ( $\Delta T_D = 0,8^\circ\text{C}$ ). На верхній, не навантаженій частині зразка (2), термопроявлення дефекту не перевищує рівень флуктуацій фонові температури.

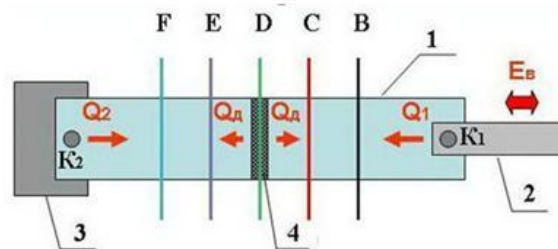


Рис. 7. Схема теплової моделі: 1 – зразок; 2 – рухлива опора зразка; 3 – нерухома опора зразка; 4 – область розташування поперечного дефекту Д; К<sub>1</sub> – точка подавання циклічних напружень f; К<sub>2</sub> – точка кріплення зразка до нерухомої опори; Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub> – тепло, яке виділяється в точках кріплення зразка; Q<sub>д</sub> – тепло, яке виділяється в області розташування дефекту. Перерізи В, С, D, Е, F – області аналізу динаміки росту температури при циклічному навантаженні зразка

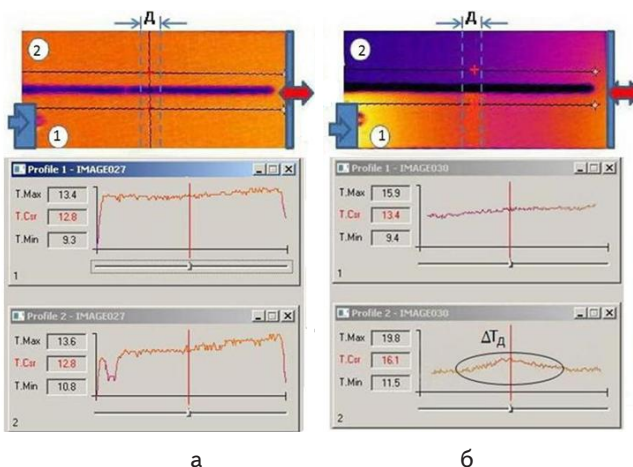


Рис. 8. Термозображення і термограми зразків з алюмінієвого сплаву 6111, що мають поперечний дефект типу "порушення мікроструктури матеріалу": 1 – термо-зображення і термограма зразка, що має твердий контакт (К<sub>2</sub>) з нерухомою опорою; 2 - термозображення і термограма зразки, що не має контакту (К<sub>2</sub>) з нерухомою опорою; а – не навантажені, б – навантажені циклічним напруженням 22 кГц

На термозображеннях і термограмах, наведених на рис. 9, показані особливості термопроявлення локального дефекту (дефект «стороннє включення - порушення структури матеріалу», діаметр 15 мм, на пластині конструкційної сталі товщиною 2 мм) при циклічному навантаженні 22 кГц. Максимальне значення термоаномалії (17,0°С, на 4,5°С більше фонові температури) і точність її розташування в області дефекту спостерігалася на 25 секунд з початку дії циклічного навантаження. Далі, згодом, термопроявлення в області дефекту розширюється (при цьому відносне значення амплітуди термоаномалії на 55 секунд дії циклічного навантаження зменшується до 2,4 °С) за



рахунок механізмів теплопровідності і розсіювання тепла, тепловиділення в точках закріплення зразка.

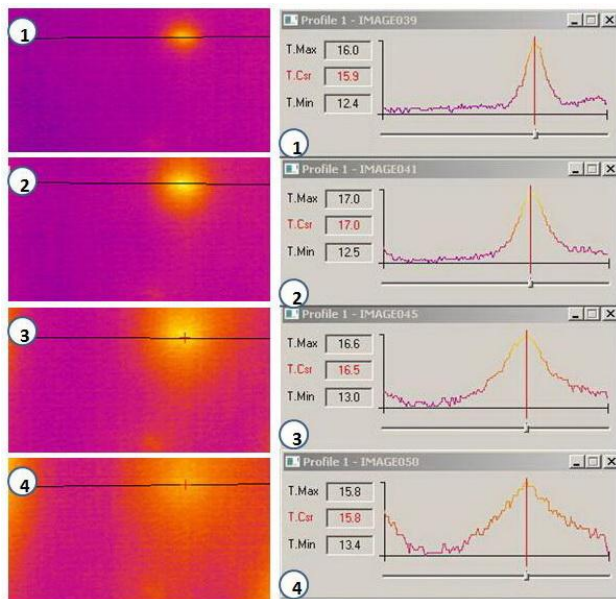


Рис. 9. Термопроявлення локального дефекту типу «стороннє включення» на сталевій пластині

Матеріал має такі параметри (Сталь 35; товщина пластини - 2 мм ; діаметр дефекту - 15 мм) при циклічному навантаженні 22 кГц; 1, 2, 3, 4 - термообрази і термопрофілі перерізів пластини, що

відповідають 15, 25, 35 і 55 секундам впливу циклічного напруження частотою 22 кГц відповідно.

#### 4. Висновки

1. Розроблено експериментальну установку, яка реалізує активний термографічний метод дефектоскопії твердих тіл на основі використання енергії циклічних напружень і енергії інфрачервоного випромінювання від широкоформатного випромінювача - абсолютно чорного тіла.

2. Розпізнавання та ідентифікація дефектів на термоображеннях за їх тепловими «образами» базується на системних правилах обробки інформації, теорії розпізнавання образів, методах і алгоритмах кореляційної обробки термоображень, одержаних з певним часовим інтервалом. Ідентифікаційні ознаки термопроявлення дефектних структур визначаються за мірою кореляції і динамікою зміни параметрів вектора стану термоаномалій в області їхнього прояву. Використання динамічної фільтрації термоображень забезпечує можливість виявлення дефектів у матеріалах на ранній стадії їхнього розвитку.

3. Експериментально доведена можливість виявлення сучасними тепловізійними засобами контролю термопроявлення мікроструктурних неоднорідностей і дефектів (тріщин, свищів, включень) в металах при циклічних навантаженнях зразків. При цьому, дефекти мікроструктури матеріалу при поглинанні пружної енергії створювали термоаномалії, амплітуда яких перевищувала фонові значення температури на 4°C і більше.

#### Література

1. Базалеев, М. И. Влияние випромінювальної здатності на інформативність поля інфрачервоного випромінювання [Текст] / М. И. Базалеев, Б. Б. Бандурян, В. В. Брюховецький, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко, Є. М. Прохоренко. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. - №5/4(35). – С. 32-36.
2. Вавилов, В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. [Текст] / В. П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 1991. – 240с.
3. Фокин, В. М. Научно-методологические основы определения теплофизических свойств материалов методом неразрушающего контроля. [Текст] / В. М. Фокин. – М.: Издательство «Машиностроение-1», 2003. – 140с.
4. Базалеев, Н. И. Тепловизионная дефектоскопия и диагностика компрессорного оборудования. [Текст] / Н. И. Базалеев, Б. Б. Бандурян, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко, Г. В. Кирик, А. Д. Стадник. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – №2(20), июнь 2010. – С.37-43.
5. Thomas, R. L. Thermal NDE Techniques – from Photoacoustics to Thermosonics / R. L. Thomas // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 21, edited by D. O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP Conference Proceedings. – 2002. - V. 615, American Institute of Physics, Melville, NY, P. 3-13.
6. Wu, D. T. Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials / D. T. Wu and G. Busse. // Revue Generale de Thermique.- 1998.- V.37(8).- P. 693-703.
7. Buss, G. Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography / G. Buss, D. Wu and W. Karpen // J. Appl. Phys. – 1992. - V. 71(8). - P. 3962-3965
8. Morbidini, M. Prediction of the thermosonics signal from fatigue cracks in metals using vibration damping measurements / M. Morbidini, P. Cawley, T. Barden, D. // J. Appl. Phys. – 1997. - V.83 (4). - P. 2385-2388.
9. Maldague, X. Pulsed phase infrared thermography [Текст] / Maldague X., Marinetty S. // J. Appl. Phys. – 1996. - V.79 (5). - P. 2694-2697.
10. Han, X. Thermosonics: Detecting cracks and adhesion defects using ultrasonic excitation and infrared imaging [Текст] / X. Han, L.D. Favro, Z. Ouyang, R.L. Thomas // The Journal of Adhesion. – 2001. - V.76(2). – P. 151-162.
11. Henneke, E. G. Thermography. An NDI method for damage detection [Текст] / E. G. Henneke, K. L. Reifsnider, W. W. Stinchcomb // Journal of Metals. – 1979. – V.31. - P. 11-15.