

**Обґрунтовано можливість ідентифікації дефектів на основі термоакустичних ефектів і їх прояву в полі інфрачервоного випромінювання методами активної термографії. Представлено дані результатів експериментальних досліджень виявлення дефектів і структурних змін в матеріалі об'єкта дослідження методом тепловізійного контролю при тепловому і акустичному активуючому впливі. Обговорюється ефективність застосування запропонованого методу виявлення дефектів**

**Ключові слова:** тепловізор, структурні зміни, акустотермографія, інфрачервона радіометрія, неруйнівний контроль, теплові поля

**Обоснована возможность идентификации дефектов на основе термоакустических эффектов и их проявления в поле инфракрасного излучения методами активной термографии. Представлены данные результатов экспериментальных исследований выявления дефектов и структурных изменений в материале объекта исследования методом тепловизионного контроля при тепловом и акустическом активированном воздействии. Обсуждается эффективность применения предложенного метода выявления дефектов**

**Ключевые слова:** тепловизор, структурные изменения, акустотермография, инфракрасная радиометрия, неразрушающий контроль, тепловые поля

УДК 681.2:620.1

# НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ І ДЕФЕКТОСКОПІЯ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ АКТИВНОЇ ТЕРМОГРАФІЇ

**М. І. Базалєєв**

Кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник\*

E-mail: fort-58@mail.ru

**Б. Б. Бандурян**

Кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник\*

E-mail: fort-58@mail.ru

**В. В. Брюховецький**

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

E-mail: fort-58@mail.ru

**В. Ф. Клепиков**

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

E-mail: fort-58@mail.ru

**В. В. Литвиненко**

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

E-mail: fort-58@mail.ru

**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

Сучасні енергетичні комплекси, які оснащено технологічним обладнанням з критичними термінами експлуатації, вимагають реалізації високоефективної технології неруйнівної дефектоскопії, яка забезпечує високу продуктивність, ефективність, якість і достовірність контролю, паспортизацію обладнання. Існуючі методи неруйнівного контролю і дефектоскопії через вплив великої кількості випадкових факторів не є абсолютними, про наявність дефектів можна говорити з тією чи іншою мірою імовірності. Однак раціональне поєднання декількох методів дефектоскопії підвищує надійність контролю виробів, які експлуатуються в складних умовах механічного, радіаційного або хімічного впливу, збільшує надійність і довговічність обладнання, забезпечує попередження аварійних ситуацій, пов'язаних з руйнуванням конструкцій.

Базуючись на фундаментальних результатах в області генерації акустичних і теплових хвиль, вже розроблено ефективні методи сучасної спектроскопії, діагностики теплофізичних і пружних параметрів об'ємних матеріалів і тонкоплівкових структур, а також ефективні методи сучасної мікроскопії. Разом з тим неруйнівні технології, що швидко розвиваються останнім часом, вимагають удосконалення вже наявних і створення нових діагностичних методів, у тому числі і на основі комбінованих методів, що використовують інформативні параметри акустичних і теплових полів. З погляду практичних застосувань дослідження подібного роду спрямовані на створення наукової бази принципово нових методів діагностики і неруйнівного контролю, а також дефектоскопії сучасних матеріалів і структур як на стадії їхнього вивчення, так і контролю в процесі експлуатації.

Безпечна експлуатація атомних електростанцій вимагає всебічного вивчення та прогнозування власти-

востей матеріалів та конструкцій, які знаходяться під дією опромінення. Особливу загрозу складає агресивна дія радіаційного випромінювання у комбінації з механічними навантаженнями і впливом сторонніх тіл. Як відомо, до найбільш суттєвих структурно-фазових змін, які спостерігаються при опроміненні матеріалів, можна виділити такі процеси як генерація нерівноважних концентрацій точкових дефектів, утворення дефектних зон, еволюція дислокаційної структури і динамічна рекристалізація, сегрегація домішок на межах зерен і фаз, локальні зміни хімічного складу, розпад твердого розчину, фазові перетворення, зародження пор і еволюція пористої структури. Всі ці фактори радіаційної дії на матеріали можуть суттєво впливати на механічні властивості матеріалів і навіть на можливість матеріалів проявляти ефект надпластичності, тобто в умовах радіаційної повзучості можуть діяти механізми деформації, які є властивими для надпластичності. Таким чином, матеріали та конструкції атомних електростанцій, які піддаються дії опромінення і в той же час механічним навантаженням при деякому збігу обставин можуть проявити ефект надпластичності, що може в свою чергу привести до дуже швидкого їх руйнування. Тому важливим є детектування поверхневих температурних мікрополів твердотільних об'єктів і конструкцій. Це вимагає створення нових та удосконалення існуючих методів неруйнівного контролю для оцінки залишкового ресурсу, оперативної діагностики та експертизи технічного стану конструкційних матеріалів устаткування.

## 2. Аналіз літератури по активації температурних полів при тепловізійній дефектоскопії

На основі даних аналізу об'єктивно існуючих зв'язків характеристик матеріалу з параметрами зовнішнього впливу і реакцією на ці впливи, досліджень динамічної саморегулюючої моделі матеріалу, що змінює свої параметри залежно від амплітудних і частотних характеристик зовнішнього впливу, перспективним є термографічний (тепловий) метод на основі акустичної активації теплових полів в середовищі об'єкта контролю. В основі термографічного методу знаходження дефектів лежать закономірності розповсюдження теплової хвилі в твердому тілі. При наявності ділянок підвищеного термічного опору, тобто ділянок з тріщинами та розшаруваннями, дефекти порушення суцільності виявляються тепловізійними методами виходячи з розподілу температурного поля на поверхні об'єкта контролю. Для практичної реалізації даного методу є необхідним створення визначеного теплового впливу на об'єкт контролю (активаційна дія), при якому неоднорідності теплового поля, що проявляються на поверхні, є достатніми для знаходження дефектів сучасними тепловізійними системами. Визначення теплових поверхневих аномалій, що виникають в місцях існування внутрішніх дефектів, здійснюється на основі числового моделювання процесу розповсюдження теплової хвилі в твердому тілі, при якому настає гарантоване знаходження дефектів.

Процеси трансформації енергії теплових і акустичних хвиль у твердотільних об'єктах відкривають принципово нові перспективи використання неруйнівних

теплових методів контролю. Трансформація енергії акустичної хвилі здійснюється за двома основними напрямками: 1) пряме перетворення (дисипація) енергії акустичної хвилі в теплову енергію; 2) вплив на механізм теплопровідності матеріалів твердих тіл, що забезпечують перерозподіл існуючих у системі теплових потоків.

Активні термографічні методи неруйнівного контролю базуються на аналізі температурних полів, стимульованих зовнішнім тепловим джерелом. На основі аналізу змін температурних полів на поверхні випромінювання об'єкта контролю, що фіксуються тепловізійною відеокамерою після дії теплового імпульсу, проводиться виявлення дефектних областей, ідентифікації розшарувань, порожнин, тощо. Істотним напрямком для подальшого розвитку термографічних методів є більш глибоке вивчення фізичних процесів, що здатні приводити до утворення дисипативних структур в тому числі тих, які призводять до перерозподілу температурних полів, спричинених дефектною структурою зразка, використання відомого ефекту збільшення/зменшення об'єму металів та сплавів внаслідок підвищення/зниження температури а також ефект локального збільшення температури в зоні тріщини при прикладенні до деформованого об'єкту циклічного навантаження [1]. Різновидом термографічного методу контролю є вібротермографія, що заснована на примусовій дії акустичних хвиль (енергії технологічної вібрації) на об'єкт дослідження з подальшою реєстрацією теплових хвиль, які генеруються в місцях з дефектною структурою матеріалу.

Одним із перспективних та точних методів детектування схованих дефектів в матеріалах є активні термографічні методи, що використовують як збуджуваче джерело температурного поля ультразвуковий вплив. Методи активної ультразвукової термографії базуються на генеруванні теплових хвиль внаслідок термопружного ефекту, який виникає на межах дефектної області [2]. При досягненні ультразвуковим полем поверхні дефекту відбувається більш інтенсивна дисипація його енергії, що спричиняє підвищення температури внаслідок розбалансованості коливань границь дефектної області [3]. Температурний сплеск в зоні приповерхневого дефекту може бути зафіксований тепловізійною камерою протягом мілісекунд після впливу ультразвукового імпульсу але в подальшому відбуватиметься вирівнювання теплового поля на поверхні внаслідок теплообміну. Використання в якості активуючого ультразвукового поля низькочастотних ультразвукових коливань порядку 10 кГц з тривалістю впливу 50-250 мс (що забезпечує передачу енергії до досліджуваного об'єкту близько 10 джоулів) дозволяє ідентифікувати тріщини втомленості, розрізи, розшарування, час прояву яких становить близько 10 мс після початку дії активуючого імпульсу [4]. При застосуванні джерел ультразвукового випромінювання особлива увага повинна приділятися способу формування пружних хвиль у об'єкті дослідження (безперервний, імпульсний), методу аналізу одержуваних зображень, узгодженню значень акустичного опору матеріалів досліджуваного об'єкту та ультразвукового випромінювача, вибору співвідношення значення енергії активуючого впливу з швидкістю дисипації теплової енергії в матеріалі, що досліджується.

Відомо [2, 5], що тріщини у твердотільному зразку нагріваються до високої температури при дії на них ультразвуковою хвилею низької частоти і високої енергії. На ефекті фрикційного нагрівання розламу тріщини базується вібротермографічний метод неруйнівного контролю для виявлення невидимих (прихованих) тріщин у твердих тілах при опроміненні зразків акустичними хвилями низької частоти (10 – 50 кГц) високої енергії [6]. Донедавна для збудження акустичних хвиль високої енергії використовувалася енергія вибуху 500 - 3000 Дж тривалістю менш однієї секунди, що дозволяло “розігріти” тріщину до рівня, який би забезпечував можливість виявлення термоаномалій існуючими тепловізійними засобами. Створення сучасної високочутливої тепловізійної техніки дозволяє розширити можливості методу шляхом використання більш низьких енергій збудження і можливості виявлення більш дрібних тріщин.

Фізичні механізми, які викликають нагрівання зони тріщини, ще дотепер є недостатньо вивченими [7 – 9]. Процес проходження звукової хвилі в матеріалі визначається фізико-механічними властивостями середовища. У більшості тіл поширення введеної звукової енергії до дефектної зони є досить швидким процесом (наприклад, швидкість звуку в сталі приблизно 6 мм/мкс), майже миттєвий у порівнянні зі швидкістю поширення теплової (температурної) хвилі. Швидкість поширення теплової хвилі досить низька, що дозволяє реєструвати її поширення за допомогою інфрачервоної апаратури (тепловізора), який має частоту кадрів 30-60 Гц.

Амплітуда, частота і тривалість акустичного збудження – це основні фактори (параметри), які визначають ефективність процесу виявлення прихованих тріщин [10]. Одним з визначальних факторів є спосіб введення акустичної енергії в об'єкт, що досліджується. Джерело акустичної енергії повинно мати досить добрий акустичний контакт із матеріалом об'єкту дослідження і мати потужність, яка була б достатньою для порушення дефекту в найбільш віддаленій від джерела точці об'єкта, тобто джерело енергії повинно бути узгодженим з акустичним опором об'єкта в усіх напрямках поширення акустичної хвилі.

При налаштуванні термоакустичного контролю необхідно враховувати зазначені вище фактори, а виявлення дефектів робити шляхом порівняння поточних даних з даними попередніх вимірів, які служать опорною базою в банку даних для кожного з об'єктів контролю. Не завжди в первинному інфрачервоному зображенні об'єкта контролю можливе виділення термоаномалії, яка обумовлена прихованою тріщиною. Необхідна додаткова, спеціальна, обробка зображення, яка дозволяє виявити її присутність. Методи кореляційної обробки зображень, одержаних при різних рівнях енергетичного впливу на приховані дефекти, дозволяють вирішити цю проблему. Надійність виявлення дефектів повинна підтверджуватися необхідними даними математичного моделювання і даними експериментальних досліджень.

### 3. Принципи застосування активуючого впливу

Перспективи розвитку принципів активуючого впливу полягають, на нашу думку, в більш широкому

залученні фізичних моделей, якими встановлювався б взаємозв'язок між процесами в дефектних областях та їх тепловим проявом. Відтак є доцільним поєднати декілька типів активуючого впливу, наприклад, ультразвуковий вплив з одночасним розігрівом або охолодженням. Аналіз спектрів термограм також має напрям удосконалення, заснований на використанні апарату дробових похідних до аналізу фазових портретів зашумлених сигналів. Окремим напрямком може бути встановлення впливу приповерхневих дефектів на коефіцієнт теплового випромінювання твердих тіл. В даній роботі ми на основі розгляду принципів активної ультразвукової термографії запропонували підходи до підвищення чутливості на основі використання кореляційного аналізу синхронної дії зовнішніх полів різної фізичної природи. Існує деяке критичне значення зовнішнього впливу на систему, при якому ініціюється процес структурної перебудови внутрішніх теплових потоків, утворюються просторо-розподілені структури акустичного і теплового полів, що формують особливий термодинамічний режим, який відбиває специфіку будови і динамічних зв'язків усередині системи. При цьому система переходить у самоузгоджений режим, термодинамічна рівновага якої визначається величиною енергетичних потоків, що надходять у неї ззовні. Такі дії можна розглядати як внесення в систему інформаційного енергетичного стимулятора, що переводить систему в новий стан з більш високим рівнем інформативності поверхневого температурного поля об'єкта контролю. Для підвищення інформативності поверхневого температурного поля необхідно визначити оптимальне значення внесеної потужності, що переводить систему в стан інформаційного оптимуму.

Як джерело порушення акустичних хвиль (випромінювача) може бути використаний лазерний оптико-акустичний метод порушення хвиль. Перевагою методу перед традиційними є відсутність безпосереднього контакту з випромінювачем, можливість введення енергії в будь-яку точку поверхні об'єкта контролю і регулювання в широких межах енергетичних і геометричних параметрів джерел звуку. Метод екологічно чистий, безпечний і зручний в експлуатації при експериментальних дослідженнях і в умовах промислового виробництва. Теорія оптичної генерації звуку в металах, що базуються на динамічній теорії термопружності, у цей час достатньо розвинена і апробована в реальних умовах.

### 4. Матеріали експериментальних досліджень

На рис. 1 і рис. 2, як приклад, представлено дані результатів експериментальних досліджень ефективності застосування тепловізійного методу для виявлення дефектів і структурних змін в матеріалі об'єкта дослідження при тепловому і акустичному активуючому впливі. Досліджування проводилися на спеціалізованому стенді, який дозволяв імітувати різні види теплового і акустичного впливу на об'єкт дослідження і вимірювати поле ІЧ-випромінювання за допомогою тепловізійної системи LIPS 814 (роздільна здатність по температурі 0,08 К у спектральному діапазоні ІЧ-випромінювання 8-14 мкм) і фотопіметра



Fluke 576. Тепловий вплив здійснювався прямокутним ІЧ-випромінювачем - АЧТ, що перекривав всю площу об'єкта дослідження. Акустичний (ультразвуковий) активуючий вплив здійснювався механічним контактом ультразвукового випромінювача акустичних хвиль - УЗДН-22, частоти 22 і 44 кГц, потужність від 0,1 до 1,0 кВт). Як зразки використовувалися сталеві (Ст.3) пластинки 210x150 мм<sup>2</sup>, товщиною від 2 до 10 мм. Ефективним є порівняння термограм на початку експеримента (рис. 1, а), під час експерименту (рис. 1, б), і результуюча термограма після комп'ютерної обробки (рис. 1, в).

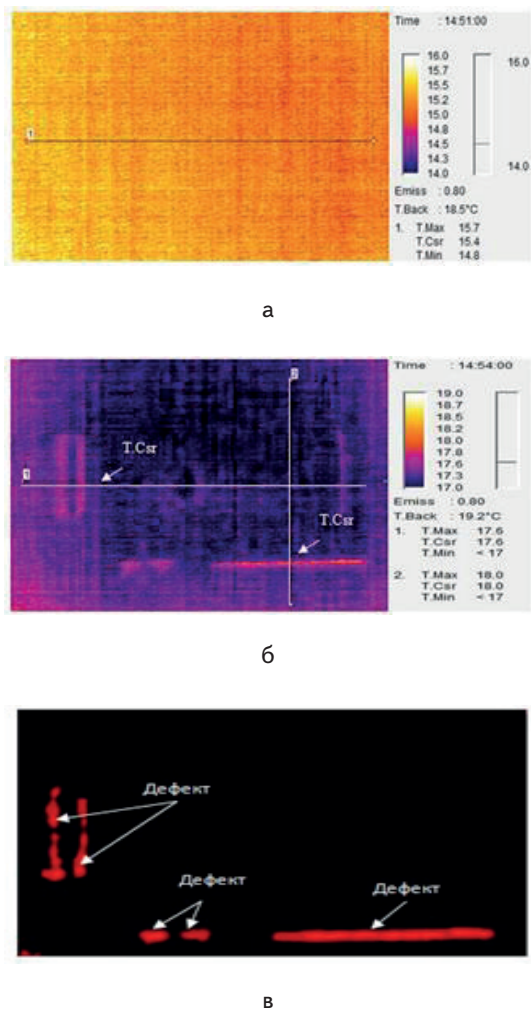


Рис. 1. Термограми прояву дефектів при активуючому тепловому впливі: а – термограма зразка в ізотермічному режимі (характеризує стан поля ІЧ-випромінювання на момент початку нагрівання); б – термограма зразка після 3 хвилин нагрівання; в – результат ідентифікації дефектів на основі комп'ютерної обробки даних тепловізійної зйомки

В даному випадку об'єктом дослідження являється сталевая пластина товщиною 2 мм із плямами іржі на зовнішній поверхні з імітуванням прихованих дефектів (поздовжні і поперечні пази, що вифрезеровані на внутрішній стороні і пластини. Глибина паза – 1 мм, ширина 3-4 мм).

Наступним етапом було дослідження дефектів які відрізнялись не тільки формою чи розмірами, але і складом матеріалу. Досліджувались термограми у випадку теплової активації: на початку нагріву (рис. 2, а), в кінці нагріву (рис. 2, б). У випадку ультразвукової активації: початкова стадія (рис. 2, в), давгострокова дія (рис. 2, г). Термограми представлені на рис. 2.

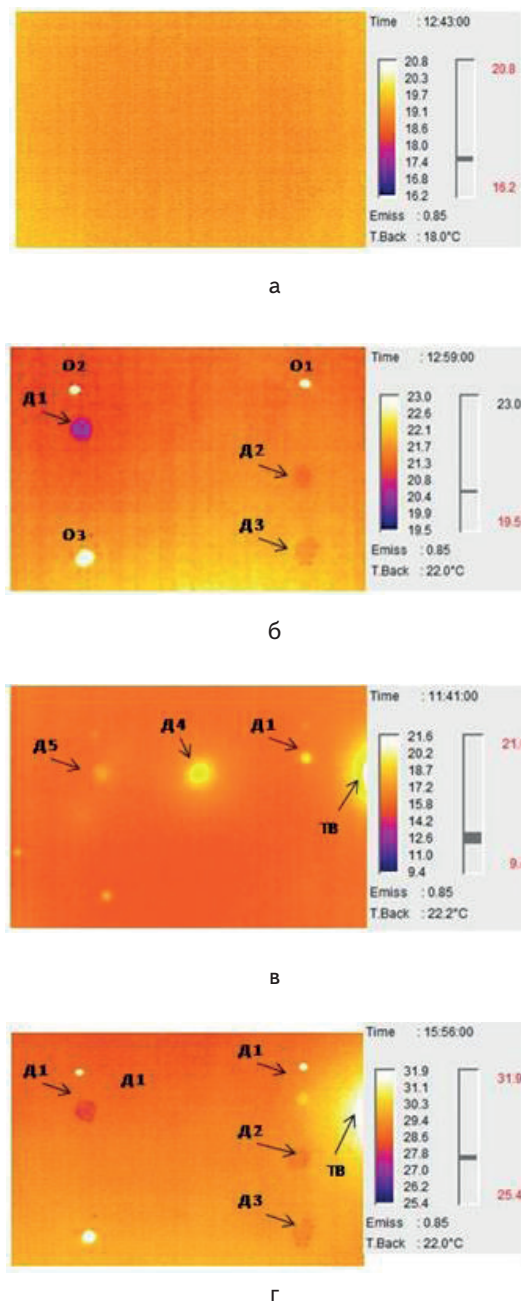


Рис. 2. Термограми прояву неоднорідностей або дефектів в металах при тепловій і акустичній активації: а – термограма зразка у початковому стані (ізотермічний режим); б – термограма зразка після 16 хвилин нагрівання внутрішньої поверхні пластини потоком ІЧ-випромінювання АЧТ; в – термограма після 2 хвилин акустичного впливу (частота 22 кГц) на пластину, що знаходилася в ізотермічному стані; г – термограма після 4 хвилин акустичного впливу (частота 22 кГц) на пластину, що знаходилася в ізотермічному стані

На цьому рисунку приведені термограми експериментів прояву дефектів в металах. Об'єкт дослідження – сталеві пластини товщиною 2 мм з імітованими включеннями (дефекти Д1-Д3 - запресовані в пластину циліндри 10x2 мм; Д1 – мінеральна суміш; Д2 – латунь; Д3 – свинець. Дефект Д4 – мінеральна суміш (типу накипу), що заповнює глухий отвір 10x1 мм з внутрішньої сторони пластини; Д5 – отвір який закритий сталевим болтом, що затягнутий гайкою. О1 – О3 – реперні отвори. ТВ – контактна точка вводу акустичних хвиль. На пластину з обох сторін нанесено лакофарбове покриття.

На рис. 3, як приклад практичного застосування методу наведено тепловізійне зображення частини корпусу посудини високого тиску системи паропостачання (після комп'ютерної обробки зображення). Виділені термоаномалії ідентифіковано як дефекти ерозійно-корозійного походження (раковини на внутрішній поверхні корпусу).

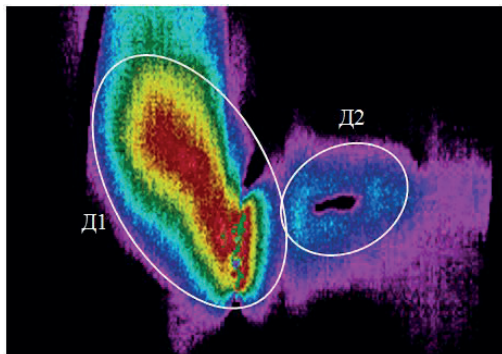


Рис. 3. Тепловізійне зображення частини корпусу посудини високого тиску системи паропостачання (після комп'ютерної обробки зображення)

Експерименти підтвердили існування механізмів акустоелектронної взаємодії, теплових ефектів, які спостерігаються у місцях зосередження і трансформації енергії акустичної хвилі, формування теплових і температурних полів високої інформативності, що відображають структуру об'єкта дослідження. Встановлено, що підвищення відношення сигнал/пе-

решкода багато в чому залежить від типу матеріалу, форми/товщини об'єкта дослідження, а також параметрів активуючого впливу (зокрема, при акустичному впливі важливим параметром є частота хвиль). Виявлені характерні параметри спектрів сигналів і перешкод, врахування яких забезпечує ефективну фільтрацію хибних термоаномалій.

Цінність проведених досліджень полягає в тому, що застосування активуючого зовнішнього впливу дозволяє ідентифікувати деградацію теплофізичних властивостей матеріалів в зоні дефектоутворення, диференціювати походження температурних аномалій і врахувати дію зовнішніх чинників, що створюють хибні термоаномалії при тепловізійному контролі. Тепловізійна діагностика і дефектоскопія на основі активної термографії може стати одним із найефективніших методів ідентифікації дефектів і оцінки ресурсу експлуатації конструкційних матеріалів корпусів реакторів і устаткування енергоблоків АЕС.

## 5. Висновки

1. Показано, що для детектування схованих дефектів в матеріалах перспективним є термографічний метод на основі акустичної активації теплових полів в середовищі об'єкта контролю. В основі термографічного методу знаходження дефектів лежать закономірності розповсюдження теплової хвилі в твердому тілі. При наявності ділянок підвищеного термічного опору, тобто ділянок з тріщинами та розшаруваннями, дефекти порушення суцільності виявляються тепловізійними методами виходячи з розподілу температурного поля на поверхні об'єкта контролю.

2. Приведено приклади практичної реалізації даного методу зі створенням визначеного теплового впливу на об'єкт контролю (активаційна дія), при якому неоднорідності теплового поля, що проявляються на поверхні, були достатніми для знаходження дефектів сучасними тепловізійними системами.

3. Метод може бути застосований як в умовах стендових випробувань, так і у випадках перебування матеріалів обладнання під дією технологічних циклічних навантажень.

## Література

1. Ранцевич, В. Б. Тепловой метод выявления трещин при стендовых испытаниях изделий на усталость [Текст] / В. Б. Ранцевич // Дефектоскопия. - №5. - 1977. - С.102-108.
2. Mignogna, R. B. Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials [Текст] / R. B. Mignogna, R. E. Green, J. Duke, E. G. Henneke, K. L. Reifsnider // Ultrasonics. – 1981. – V.7, P.159-163.
3. Maldague, X. Pulsed phase infrared thermography [Текст] / Maldague X., Marinetty S. // J. Appl. Phys. – 1996. – V.79 (5). – P. 2694-2697.
4. 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.
5. 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.
6. Favro, L. D. Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse [Текст] / L. D. Favro, X. Han, Z. Ouyang, G. Sun, H. Sui, R. L. Thomas // Review of Scientific Instruments. – 2000. – V.71(6). – P. 2418-2419.
7. Nordal, P. E. Photothermal radiometry [Текст] / P. E. Nordal, S. O. Kanstad // Physica Scripta. – 1979. – 20 – P. 659-662.
8. Beaudoin, J. L. Numerical system for infrared scanners and application to the subsurface control of materials by photothermal radiometry [Текст] / J. L. Beaudoin, E. Merienne, R. Danjoux // In: Infrared Technology and Applications, SPIE 590. – 1985. – p. 287.

9. Dillenza, A. Ultrasound lockin thermography: feasibilities and limitations [Текст] / A. Dillenza, G. Bussea, D. Wub // In: Photoacoustic and Photothermal Phenomena. Heidelberg: Springer-Verlag. – 1998. – P. 412-418.
10. Базалєєв, Н. И. Концепція розвитку неруйнівних методів контролю енергетичного обладнання АЕС на основі кореляційної ІЧ-радіометрії [Текст] / Н. И. Базалєєв, Б. Б. Бандурян, В. В. Брюховецький, В. Ф. Клепиков, В. В. Литвиненко // Восточно-європейський журнал передових технологій. – 2008. – №4/5(34). – С. 10-16.

*Представлено результати дослідження електрофізичних параметрів (постійної Холла, питомого опору, рухливості) ниткоподібних мікрокристалів  $Ga_xIn_{1-x}As$ , вирошених з газової фази, в діапазоні складів бінарних компонентів  $0,3 \leq x \leq 0,8$ . За характером зміни температурних залежностей цих параметрів в зоні власної та змішаної провідності були проведені розрахунки ширини забороненої зони для досліджуваних мікрокристалів. Показані результати дослідження впливу нейтронного опромінення на параметри вирошених мікрокристалів та визначений склад твердого розчину  $Ga_xIn_{1-x}As$ , для якого зміна параметрів під дією опромінення є мінімальною*

*Ключові слова: ниткоподібні мікрокристали,  $Ga_xIn_{1-x}As$ , електрофізичні параметри, ширина забороненої зони, радіаційна стійкість*

*Представлены результаты исследования электрофизических параметров (постоянной Холла, удельного сопротивления, подвижности) нитевидных микрокристаллов  $Ga_xIn_{1-x}As$ , выращенных из газовой фазы, в диапазоне составов бинарных компонентов  $0,3 \leq x \leq 0,8$ . По характеру изменения температурных зависимостей этих параметров в зоне собственной и смешанной проводимости были проведены расчеты ширины запрещенной зоны для исследуемых микрокристаллов. Показаны результаты исследования влияния нейтронного облучения на параметры выращенных микрокристаллов и определен состав твердого раствора  $Ga_xIn_{1-x}As$ , для которого изменение параметров под действием облучения минимальна*

*Ключевые слова: нитевидные микрокристаллы,  $Ga_xIn_{1-x}As$ , электрофизические параметры, ширина запрещенной зоны, радиационная стойкость*

## 1. Вступ

Електронні прилади, виготовлені на основі напівпровідникових сполук  $A^{III}B^V$  та їх твердих розчинів, на даний час знаходять все більш широке застосування в різних сферах електроніки, телекомунікації та оптоелектроніки. Так напівпровідниковий твердий розчин  $Ga_xIn_{1-x}As$  широко використовується для розробки приладів електронної техніки різних напрямків.

УДК 621.315.592

# ОСНОВНІ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ НИТКОПОДІБНИХ МІКРОКРИСТАЛІВ ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ $Ga_xIn_{1-x}As$

**І. А. Большакова**

Доктор технічних наук,  
професор, завідувач лабораторії  
Лабораторія магнітних сенсорів\*  
E-mail: inessa@mail.lviv.ua

**Я. Я. Кость**

Кандидат технічних наук, науковий співробітник\*\*  
E-mail: inessa@mail.lviv.ua

**О. Ю. Макідо**

Кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник\*\*  
E-mail: inessa@mail.lviv.ua

**Р. М. Стецко**

Молодший науковий співробітник\*\*  
E-mail: inessa@mail.lviv.ua

**Ф. М. Шурігін**

Кандидат технічних наук, провідний спеціаліст\*\*  
E-mail: inessa@mail.lviv.ua

\*Кафедра напівпровідникової електроніки\*\*\*

\*\*Лабораторія магнітних сенсорів\*\*\*

\*\*\*Національний університет

«Львівська політехніка»

вул. Котляревського 1, м. Львів, Україна 79013

Після катастроф у Чорнобилі і Фукусімі особливо актуальною є проблема пошуку матеріалів зі стабільністю параметрів в жорстких радіаційних умовах. Потрібні напівпровідникові сполуки  $A^{III}B^V$ , зокрема  $Ga_xIn_{1-x}As$ , є перспективними для створення на їх основі радіаційностійких сенсорів за рахунок збереження у твердому розчині індивідуального поведінки підграток бінарних компонентів та протилежного напрямку зміни концентрації при високих дозах радіаційного опромі-