

МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 621.307

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ ОЦІНКИ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЕФЕКТІВ МЕТОДОМ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ

В. Ю. Глуховський, В. О. Троїцький

*Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Боженко, 11, Київ-150, 03680*

Розглянута особливість формування температурного поля на поверхні об'єктів контролю. Запропонована конструкція контрольного зразка із штучними дефектами та проведено експериментальні дослідження з визначення характеристик температурних полів методом активного теплового контролю. Розроблена схема лазерно-термографічного приладу для визначення кількісних параметрів дефектів.

Ключові слова: тепловий неруйнівний контроль, тепловізор, тепла дефектоскопія, тепла дефектометрія, контрольний зразок, лазерний вимірювальний пристрій.

Рассмотрена особенность формирования температурного поля на поверхности объектов контроля. Предложена конструкция контрольного образца с искусственными дефектами и проведены экспериментальные исследования по определению характеристик температурных полей методом активного теплового контроля. Разработана схема лазерно-термографического прибора для определения количественных параметров дефектов.

Ключевые слова: тепловой неразрушающий контроль, тепловизор, тепловая дефектоскопия, тепловая дефектометрия, контрольный образец, лазерный измерительный прибор.

Considered feature formation temperature field on the surface of objects control. The design of the control sample with artificial defects and conducted experimental studies to determine the characteristics of temperature fields by active thermal control. The scheme laser thermographic device for quantification of defects.

Keywords: thermal non-destructive testing, thermal imager, thermal testing of thermal defektometriya the reference sample, laser measuring device.

Вступ. Тепловий неруйнівний контроль (ТНК) в світовій та вітчизняній дефектоскопії на даний час займає все більш важливе місце при проведенні робіт з діагностики технічного стану різноманітних промислових об'єктів. ТНК базується на вимірюванні температури на поверхні об'єктів контролю (ОК) шляхом реєстрації теплового випромінювання. Ця галузь техніки отримала назву термографія (або тепlobачення). За сформованою до нинішнього часу термінологією під термографією розуміють методи аналізу просторового та часового розподілення теплової енергії (температури) в фізичних об'єктах, що супроводжується, як правило, побудовою теплового зображення (термограм) [1].

Теплові методи контролю дозволяють проводити дистанційну технічну діагностику у процесі експлуатації об'єктів, що особливо актуально для неперервних виробничих

процесів та потенційно небезпечних об'єктів. Ці методи базуються на вимірюванні надмірного температурного поля на поверхні об'єкта контролю, що виникає під час його функціонування. Найбільше розповсюдження теплові методи отримали в таких галузях: металургійна промисловість, машинобудування, електрообладнання та електроенергетика, хімічна та нафтохімічна промисловість, будівлі та споруди, трубопровідний транспорт тощо.

Одним із найважливіших інструментальних теплових методів технічної діагностики потенційно небезпечних об'єктів є дистанційна інфрачервона (ІЧ) тепловізійна діагностика, що базується на реєстрації температурного поля за допомогою спеціального приладу (тепловізора) у вигляді термограм. Тепловізори дозволяють виявляти локальні аномалії температурного поля на поверхні об'єктів контролю [2]. Але, будучи відомою на протязі останніх 30 рр.,

тепловізійна діагностика об'єктів залишається якісним методом.

Невирішеною проблемою для вітчизняної тепловізійної діагностики потенційно небезпечних об'єктів є проблема визначення розмірів і координат дефектів в залежності від картини розподілення температурного поля на поверхні ОК. На наш погляд, для визначення розмірів і координат дефектів на поверхні ОК на даний час відсутні підходи до створення засобів та спеціального програмного забезпечення, а також методик та відповідної нормативної бази, які б дозволяли за розподіленням температури на початкових термограмах оцінювати технічний стан різноманітних об'єктів в реальних умовах їх експлуатації. Не дивлячись на те, що ця проблема до цього часу не вирішена, тепловізійна діагностика отримує все більшу популярність для дистанційної оцінки технічного стану потенційно небезпечних об'єктів.

При визначенні розмірів і координат дефектів на поверхні ОК ключова роль тепловізійної діагностики полягає у визначенні на відстані розподілення температурного поля з точками однакової температури, тобто ізотермічних поверхонь або ліній, що відповідають однакової температурі за товщиною ОК. Для фіксації контуру ізотермічної поверхні можна використати сучасні засоби лазерної вимірювальної техніки, потім за допомогою програмного забезпечення розрахувати площу дефекту ОК.

Формування температурного поля у структурі об'єктів контролю. Для вирішення задач, пов'язаних із знаходженням температурного поля об'єктів контролю, користуються диференціальними рівняннями теплопровідності, яке описує зв'язок між температурою, часом та координатами елементарного об'єму. Якщо тепло розповсюджується по нормалі до ізотермічних поверхонь, то тепловий потік у загальному випадку розкладається на три складові за координатними осями. Тоді диференціальне рівняння теплопровідності має такий вигляд [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T, \quad (1)$$

де $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа в декартових координатах; T – температура; a – коефіцієнт температуропровідності речовини,

$a = K / \rho c$; c – питома теплоємність речовини; ρ – густина речовини; K – коефіцієнт теплопровідності.

Для одновимірного потоку тепла диференціальне рівняння теплопровідності набуває такий вигляд [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Якщо в середині тіла є джерело тепла, то диференціальне рівняння теплопровідності буде мати такий вигляд [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{\omega}{\rho c}, \quad (3)$$

де ω – питома потужність джерела тепла, (Вт/м³).

Очевидно, що при однорідній внутрішній структурі об'єкта ($a \neq f(x, y, z, \tau)$) та при відсутності внутрішніх джерел ($\omega = 0$), температурне поле на його поверхні також буде однорідним. В іншому випадку з'являються локальні аномалії температури, які прийнято оцінювати за величиною абсолютного $\Delta T = T_0 - T$ або відносного $A = \Delta T / T$ температурного контрасту [1], де T – середня температура поверхні; T_0 – температура поверхні над місцем розміщення прихованої структурної неоднорідності (дефекту) або локального внутрішнього джерела тепла.

Величина температурного контрасту, яку можна назвати «сигналом від дефекту», залежить як від параметру дефекту, так і від багатьох інших факторів, серед яких не останнє місце займає вибір моменту часу реєстрації цього контрасту.

За часовим критерієм розрізняють два режими формування температурного поля в термографії: стаціонарний, який характерний для об'єктів з постійними внутрішніми джерелами тепла; нестаціонарний, який створюється, як правило, штучним полем з метою виявлення прихованих дефектів методом термографії.

Стаціонарний режим формування температурного поля на практиці характерний для різних об'єктів, функціонування яких пов'язано з виділенням (поглинанням) енергії: пристрої електро- та теплоенергетики, об'єкти металургії, машинобудування, нафтохімії тощо. Причинами виникнення температурного контрасту на поверхні такого роду об'єктів можуть бути різноманітні фактори, які у

більшості випадків не є аномалією внутрішньої структури (дефектами). Це можуть бути внутрішні джерела тепла, що розміщуються по об'єму визначеним образом.

На рис. 1,а схематично показано зображення такого об'єкта у вигляді пластини, в якій на глибині $h = d/2$ розміщені 3 точкових джерела тепла з однаковою потужністю ω [1].

Якщо потужність джерел постійна в часі, то тепловий режим вважається стаціонарним і для знаходження розподілення температури на поверхні пластини можна скористатися виразом для стаціонарного випадку, тобто

$$a\nabla^2 T + \frac{\omega}{c\rho} = 0. \quad (4)$$

В якості прикладу на рис.1,б показано розподілення температури на поверхні пластини, отримане на основі розрахунків для вогнетривкої глини [1].

Наявність внутрішніх джерел тепла призводить до виникнення локальних неоднорідностей температурного поля на поверхні об'єкта. Величина неоднорідності ΔT залежить як від потужності джерела тепла ω , так і від місця його розташування, а також від кількості джерел тепла.

Таким чином, виникаюче на поверхні тепловиділяючого об'єкта надлишкове температурне поле несе інформацію про його внутрішню структуру, отримання та обробка якої і є задачею термографічної дефектоскопії. Ця область застосування термографії є, по суті, методом пасивного теплового контролю.

Термографія може служити інструментом пізнання внутрішньої структури об'єкта, що знаходиться у звичайній термодинамічній рівновазі з навколишнім середовищем. В цьому випадку джерелом інформації є нестационарне температурне поле, яке створюється шляхом зовнішньої теплової дії на об'єкт при проведенні контролю.

В якості прикладу розглянемо виявлення різновисхідної однорідної пластини, схематичне зображення якої наведено на рис. 2,а [1].

Необхідно зазначити, що розроблена програма може будувати і відповідно розраховувати не тільки площинні величини дефекту, тобто його площу, а й об'ємні, а саме глибину залягання і об'єм дефектної порожнини.

На початковому етапі температура пластини дорівнює температурі навколишнього середовища T . Для створення сталого теплового режиму застосовують дію на нижню поверхню

пластини теплового потоку густиною q . Обрахування тепловіддачі в навколишнє середовище виконується з урахуванням коефіцієнту α на зовнішніх поверхнях пластини.

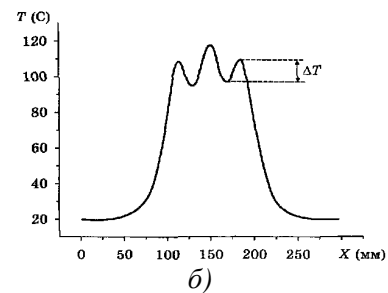
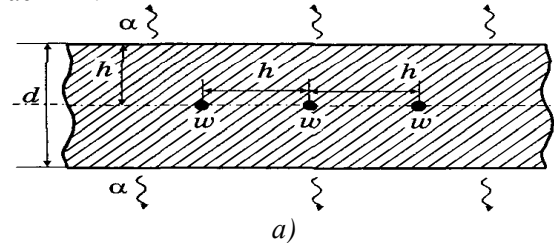


Рисунок 1 - Схематичне зображення об'єкта у вигляді пластини з трьома внутрішніми джерелами тепла (а) та розподілення температури на поверхні пластини (б)

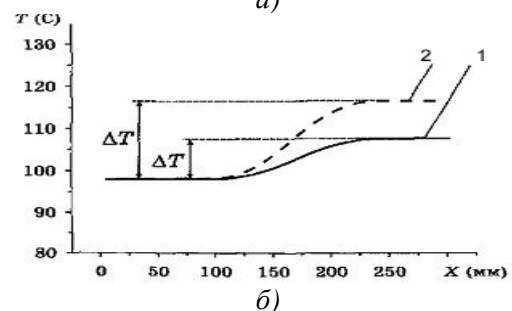
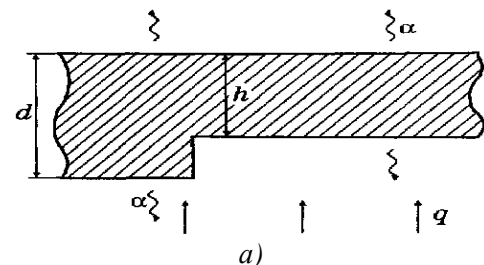


Рисунок 2 - Схематичне зображення різновисхідної однорідної пластини (а) та розподілення температури на поверхні(б) при $h = 0,9d$ (1) та $h = 0,7d$ (2)

На рис. 2,б в якості прикладу представлено температурне розподілення на поверхні пластини для моменту часу ΔT для двох

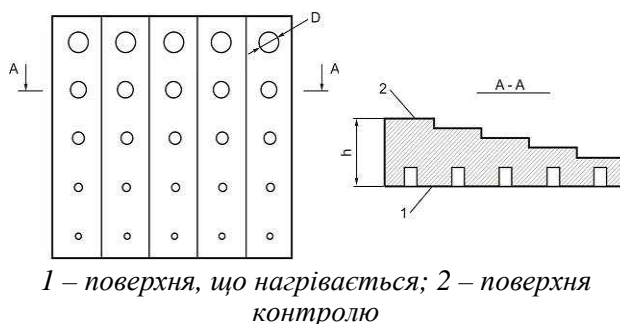
значень різновтовщинності пластини: $a-h=0,9d$; $b-h=0,7d$ [1]. З рис. 2,б видно, що температурний контраст ΔT істотно залежить від параметру дефекту h .

Наведений приклад підтверджує те, що нестационарне температурне поле, яке створюється в об'єкті контролю штучним шляхом, несе у собі інформацію про його внутрішню структуру. Це дозволяє зробити висновок, що термографія дозволяє виконувати неруйнівний контроль також тих об'єктів, які в початковому стані мають температуру навколишнього середовища. Ця галузь застосування термографії є, по суті, методом активного теплового контролю.

Стандартні та контрольні зразки в тепловій діагностиці. Нестационарне температурне поле, яке створюється в ОК штучним шляхом, несе у собі інформацію про його структуру. Але для ефективного використання цієї інформації при вирішенні задач теплової дефектометрії необхідно провести великий об'єм експериментальних досліджень. Це є найбільш складним в тепловій дефектометрії тому, що вимагає значної кількості дослідних зразків, які вміщують дефекти із строго заданими параметрами. Оскільки підібрати такі зразки з готових об'єктів контролю мало ймовірно, то застосовують метод моделювання дефектів у вже виготовленому виробі, або метод "закладання" дефекту у виріб при його виготовленні за допомогою спеціальних технологічних прийомів.

Аналогічним чином поступають при виготовленні стандартних (СЗ) та контрольних зразків в тепловій дефектоскопії. Так деякі розробники стандартних зразків для теплової дефектоскопії пропонують вирішувати задачу створення цих зразків шляхом виготовлення штучних дефектів аналогічно із стандартизацією ультразвукового методу контролю [4]. Але специфіка формування сигналу від дефекту при тепловому методі контролю не дозволяє застосовувати стандартні зразки, запозичуючи їх безпосередньо із акустичного або будь-якого іншого методу контролю. В той час при виготовленні зразків для теплового контролю деякі автори застосовують принципи побудови цих стандартних зразків, наприклад, набір моделей дефектів у зразку у вигляді отворів та пазів, що зроблені на різну глибину.

Прототипом стандартного зразка для теплового методу контролю може бути конструкція, запропонована Х. Малдагом [4], що наведена на рис.3.



1 – поверхня, що нагрівається; 2 – поверхня контролю

Рисунок 3 - Загальна конструкція стандартного зразка для теплового контролю

Відмінною особливістю цієї конструкції є наявність у моделі одночасно двох видів дефектів – порушення суцільності та різновтовщинності, параметри яких D та h варіюються в обумовлених межах.

Призначенням стандартних зразків у тепловій дефектоскопії є оперативна перевірка та налаштування тепловізора перед проведенням контролю. Тому достатньо наведений на рис.3 зразок встановити у поле зору тепловізора та включити нагрів із сторони поверхні 1. При цьому на поверхні 2 виникає температурне поле з перепадами ΔT , які викликані дефектами.

Температурне поле буде ресструватися тепловізором у вигляді термограм, які представляють собою видиме зображення температурних неоднорідностей, форма і розміщення яких відповідає закладеним в СЗ дефектам. В даному СЗ діапазон геометричних параметрів дефектів (для отворів – діаметр D , для різновтовщинності – $\Delta h/h$) вибрано таким, що деяка частина дефектів на термограмі не виявляється, що дозволяє перевірити поріг чутливості теплового методу. Цей поріг і фіксується у паспорті СЗ та використовується для тестування та налагодження тепловізора перед початком проведення контролю виробів даного типу.

Очевидно, що конкретний СЗ можна використовувати в якості налагоджувального зразку тільки для одного конкретного виду виробу – із відповідного матеріалу та з визначеною товщиною.

Останнім часом до інформативності теплового контролю висуваються все більші вимоги. Сьогодні вже замало знати про наявність дефекту в ОК. Ставиться задача на основі просторового розподілення зображень температурних полів визначити числові параметри дефектів та зробити висновок про технічний стан ОК. Особливо важливо знати розміри дефекту, його координати та

конфігурацію дефекту для потенційно небезпечних об'єктів (металургійного та нафтопереробного комплексу, котлів, ємностей і резервуарів, трубопроводів різного призначення, будівельних об'єктів тощо).

Тому під час проведення термографічної діагностики постає задача визначення геометричних розмірів як ділянки контролю, так і виявлених на ній дефектів. Сучасні термографічні прилади не дозволяють визначити ні відстань до об'єкта контролю, ні його геометричні розміри. Саме це і унеможливає в деяких випадках визначення кількісних характеристик дефектів. Таким чином, виникла потреба в удосконаленні термографічних систем за рахунок поєднання їх із засобами вимірювальної техніки.

Найбільш ефективним для цих цілей є застосування сучасної лазерної вимірювальної техніки, яка дозволяє з високою точністю вимірювати відстань та площу об'єктів контролю.

Для вивчення можливості створення лазерно-термографічної системи нами були використані контрольні зразки із штучними дефектами різної форми для отримання характеру розподілення температурних полів. Штучні дефекти імітували собою різний ступінь матеріалу в середині ОК внаслідок дії різноманітних чинників та різних геометричних форм, в тому числі і складних.

Для проведення досліджень нами були вибрані три типи контрольних зразків: без штучних дефектів, із штучними дефектами простої та складної форми.

Для виготовлення зразків вибрана пластина із Ст. 3 прямокутної форми розміром 200x300 мм товщиною 10 мм. Схематичне зображення одного зі зразків складної геометричної форми наведено на рис. 4

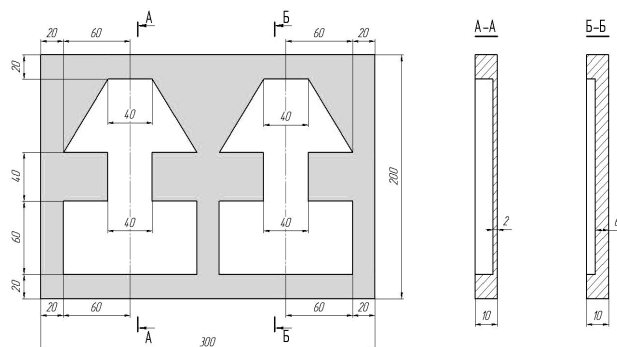


Рисунок 4 - Схематичне зображення зразка із штучними дефектами складної геометричної форми

Підготовка зразків відбувалась наступним чином: у пластинах із Ст.3 були вифрезеровані відповідні заглиблення простої і складної геометричних форм з глибинами залягання 4 мм і 8 мм відповідно. На наступному етапі пластини покривались шаром насиченої вуглеводневої рідкої суміші і розміщувались у електричну піч. Нагрівання пластин відбувалось при температурах 340 – 370°C протягом 30 хвилин. Після цього зразки охолоджувались разом з піччю. Внаслідок відповідної термічної обробки верхній шар металу пластин насичувався вуглецем при високотемпературній дисоціації вуглеводнів. Це спричинило зміну кольору металу з блискучо-сірого на чорний, підвищуючи коефіцієнт чорноти поверхні з 0,027 до 0,94.

Експериментальні дослідження температурних полів штучних дефектів контрольних зразків. Метою експериментальних досліджень температурних полів штучних дефектів було визначення можливості виявлення якісних і кількісних характеристик закладених дефектів. Такими характеристиками є ступінь прояву дефектів, контрастність проявленого дефекту, геометричні характеристики проявленого дефектів.

Експериментальні дослідження різних видів температурних полів контрольних зразків проводилися в лабораторних умовах із застосуванням активного теплового методу контролю. Для проведення досліджень була розроблена експериментальна установка, схема якої наведена на рис.5.

Експериментальні дослідження проводилися у відповідності з розробленою методикою. Контрольний зразок 2 нагрівався інфрачервоним випромінювачем 1 потужністю 1000 Вт до стаціонарної температури 52 °С, тобто до такої температури, значення якої не змінюється з часом. Нагрівання відбувалось із сторони відкритих штучних дефектів. Після досягнення заданої стаціонарної температури починалась термографічна зйомка. Температура поверхні контрольного зразка контролювалась контактною хромель-алюмелевою термопарою 3 та безконтактним інфрачервоним пірометром 4 марки CYCLOPS 300 виробництва MINOLTA-LAND (Японія). Розподілення температурного поля на поверхні контрольних зразків фіксувалось тепловізором 5 марки Ti 814 виробництва фірми LAND (Англія – Китай). Результати вимірювання температур за допомогою термопари, пірометра та тепловізора заносились в персональний комп'ютер 6.

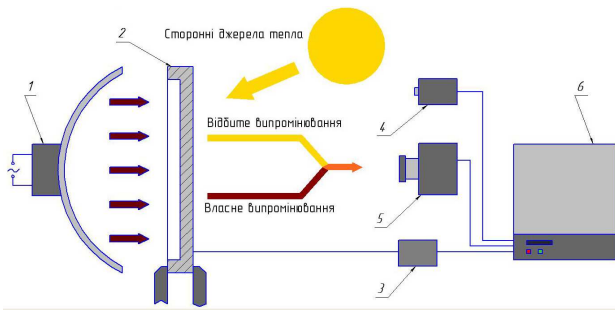


Рисунок 5 - Схема експериментальної установки для активного тепловізійного контролю зразків із штучними дефектами

У процесі експериментальних досліджень на ОК – контрольний зразок у вигляді пластини діють сторонні джерела тепла та джерело нагрівання пластини. Тому теплове випромінювання, яке фіксує тепловізійна камера, в цьому випадку буде складатись із відбитого випромінювання, що розповсюджується сторонніми джерелами тепла, власного теплового випромінювання та випромінювання від джерела нагрівання пластини. Зняття показів температурного поля поверхні виробу відбувалось за умов як стаціонарного, так і нестационарного режимів створення температурних полів дефектів. Характер зміни температури наведено на рис.6.



Рисунок 6 - Характер змінування максимальної температури контрольного зразка у процесі термографічної зйомки

Отримані термограми стаціонарного температурного поля поверхні пластини дають задовільні якісні характеристики дефекту, а саме: високий ступінь прояву дефекту та значну його контрастність. Проте кількісні характеристики визначити дуже складно (рис. 7).

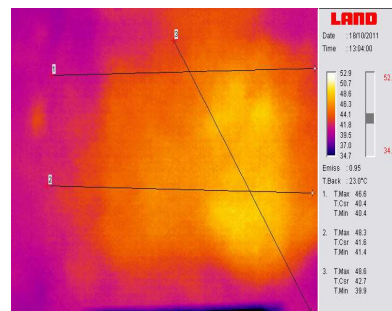
Починаючи з 23-ої секунди, температурна картина дефекту почала набувати контурів, які були закладені штучно (рис. 7, в). При цьому вже можна було говорити не лише про якісні характеристики дефекту, а і про кількісні з відповідною похибкою вимірювання.

Слід зазначити, що ступінь прояву дефектів залежить не лише від коефіцієнту чорноти його поверхні, а й від глибини його залягання. Як видно із схеми контрольного зразку (рис. 3) штучні дефекти залягають на різних глибинах і на термограмах найбільш інтенсивно проявлялись дефекти з максимальним наближенням до поверхні. Таким чином, ця залежність дає змогу визначати глибини залягання, спираючись на значення температурних картин на термограмах за ступенем інтенсивності проявлення дефектів.

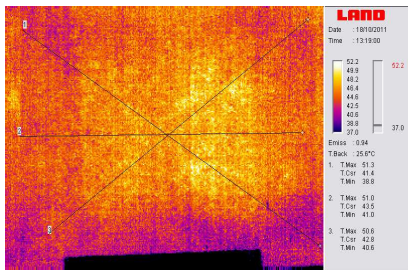
Проведені нами дослідження температурних полів штучних дефектів різної форми контрольних зразків показали, що дані про зміну температури на поверхні зразка у місці розташування дефекту містять цінну інформацію про закономірності локалізації дефектів. Розподілення температурного поля на поверхні ОК при наявності дефектів є своєрідним тепловим «відбитком» дефекту.

Структура лазерно-термографічного приладу для визначення кількісних параметрів дефектів. Проведені експериментальні дослідження розподілення температурних полів над дефектами різної форми та глибини залягання підтвердили, що по температурі поверхні ОК можна не тільки виявити місце знаходження дефекту засобами тепловізійної дефектоскопії, але і в залежності від температури, оцінювати розмір дефекту, тобто його площу, координати та глибину залягання. Отримані результати дають можливість вирішувати задачу тепловізійної дефектометрії. Для оцінки контурів температурних полів дефектів на відстані до потенційно небезпечних ОК рекомендовано застосовувати засоби лазерної випромінювальної техніки, наприклад, лазерні далекоміри.

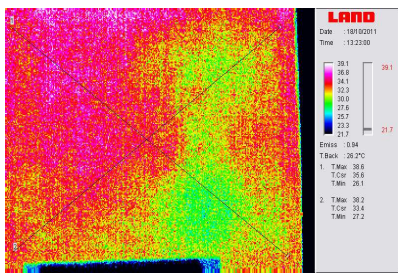
На рис. 8 наведена одна із можливих структур лазерно-термографічного приладу для визначення розмірів і координат температурних полів над дефектами ОК з використанням лазерних далекомірів.



a)



б)



в)

Рисунок 7 - Термограми стаціонарного температурного поля поверхні пластини із штучними дефектами, що зроблені на 4-й секунді (а), на 19-й секунді (б) та на 23-й секунді (в) після досягнення стабільної температури

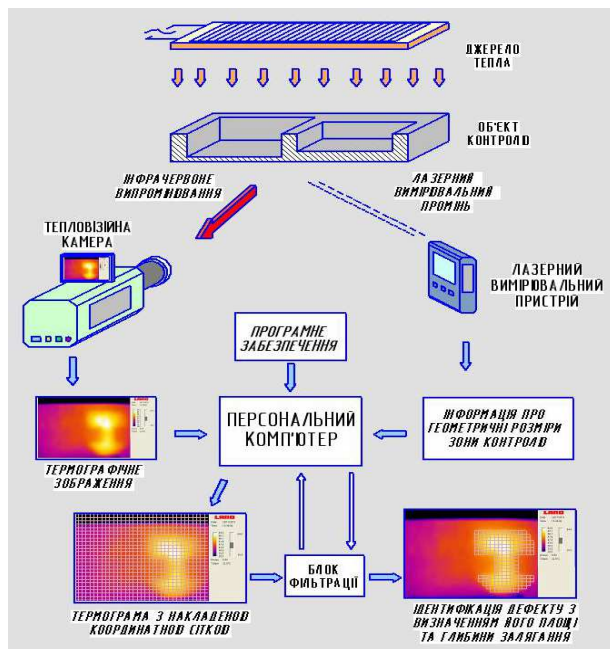


Рисунок 8 - Схема визначення розмірів і координат температурних полів ОК

Температурне поле поверхні ОК (рис. 8) фіксується тепловізійною камерою. За

допомогою лазерного вимірювального пристрою визначаються відстань до об'єкту контролю та його геометричні розміри з наступним визначенням площі контрольованої поверхні. Інформація від тепловізора і лазерного далекоміра потрапляє до персонального комп'ютера. За допомогою відповідного програмного забезпечення на поверхні термограми створюється координатна сітка, ціна поділки якої варіюється. За допомогою програмного блоку фільтрації виділяється лише та ділянка термограми, яка відповідає дефектній зоні. Відповідна зона виділяється з наступним розрахунком її площі, а також визначається глибина залягання виявленого дефекту.

Таким чином розроблена структура лазерно-термографічного приладу вирішує задачу не тільки теплової дефектоскопії ОК, а також задачу теплової дефектометрії.

З метою визначення у реальному часі геометричних параметрів дефектів було створене програмне забезпечення для розрахунку площі дефектів, що виявляються при тепловізійному контролі потенційно небезпечних і важкодоступних об'єктів. Даний програмний продукт разом з розрахунком площі дефектних ділянок контрольованої поверхні дозволяє будувати 2D або 3D сітки розрахованих дефектів. Структурна схема програмного забезпечення наведена на рис. 9.

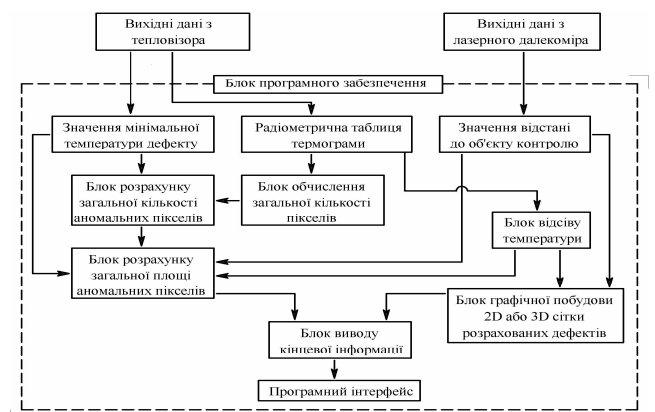


Рисунок 9 - Структурна схема програмного забезпечення

ВИСНОВКИ

Тепловізійна діагностика є необхідною і доцільною для контролю технічного стану потенційно небезпечних об'єктів і альтернативи їй немає за умови дистанційного розміщення такого об'єкта і високої чутливості та оперативності контролю.

Проведені експериментальні дослідження показали, що термограми стаціонарного

температурного поля штучних дефектів дають задовільні якісні та кількісні характеристики дефектів, а саме: високий ступінь прояву дефектів, значну його контрастність та геометричні характеристики форми дефектів.

Вирішення задачі визначення розмірів і координат дефектів на поверхні об'єктів контролю із застосуванням відповідних технічних засобів дозволяє підвищити ефективність тепловізійної діагностики потенційно небезпечних об'єктів.

1. Маслова В.А., Стороженко В.А. *Термографія в діагностиці і неразрушаючому контролі*. – Харків: «Компанія СМІТ», 2004. – 160 с. 2. Вавилов В.П., Климов А.Г. *Тепловизори і*

їх застосування. – М.: Интел универсал, 2002. – 88 с. 3. Лыков А.В. *Теория теплопроводности*. – М.: Высш. шк., 1967. – 599 с. 4. Стороженко В.А., Хорло Н.Ф., Мешков С.Н., Маслова В.А. *Подходы к созданию стандартных образцов для теплового неразрушающего контроля //Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2005. - № 1. – С. 21 – 25.

Поступила в редакцію 01.12.2014р.

Рекомендували до друку: Оргкомітет 7-ої МНТК з НК і ТД обладнання (25 – 28.11.2014р., ІФНТУНГ), докт. фіз.-мат. наук, проф. Галушак М.О.