

УДК 620.179

## ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОГО ФОТОАПАРАТУ ПРИ АКТИВНОМУ ТЕПЛОВИМУ КОНТРОЛІ МЕТАЛІВ

*В.М. Славков\*, О.П. Давиденко*

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, e-mail: dar@kpi.kharkov.ua, тел. (057)707-60-15*

*Розглянуто спосіб використання цифрового фотоапарату при проведенні процедури активного теплового контролю металів, який може знайти застосування в енергетиці, машинобудуванні, чорній і кольоровій металургії при ідентифікації поверхневих та внутрішніх дефектів металургійних виробів, зокрема виробів, виготовлених методом безперервного лиття, та прокатних виробів. За допомогою програмного забезпечення Photoshop та MathCAD здійснено обробку отриманих цифрових зображень теплових полів металевих пластин, які створюються джерелами нагріву. Дослідження проводилися з використанням цифрового фотоапарату Canon EOS 20D. Об'єктами дослідження були обрані сталеві пластини (марка сталі 08X18H10) і газовий нагрівач TORCH WS-503C. Проведено моделювання температурного поля, яке створює один або декілька однакових газових нагрівачів на сталевій пластині та отримано його тривимірне графічне представлення, за характером якого, можливо зробити висновок про наявність різних дефектів.*

*Ключові слова: цифровий фотоапарат, газовий нагрівач, температурна лампа, абсолютно чорне тіло, дефект, теплове випромінювання.*

*Rассмотрен способ применения цифрового фотоаппарата при проведении процедуры активного теплового контроля металлов, который может найти применение в энергетике, машиностроении, черной и цветной металлургии при идентификации поверхностных и внутренних дефектов металлургических изделий, в частности изделий, изготовленных методом непрерывного лития и прокатных изделий. С помощью программного обеспечения Photoshop и MathCAD осуществлена обработка полученных цифровых изображений тепловых полей металлических пластин, создаваемых источниками нагрева. Исследования проводились с использованием цифрового фотоаппарата Canon EOS 20D. Объектами исследования были выбраны стальные пластины (марка стали 08X18H10) и газовый нагреватель TORCH WS-503C. Проведено моделирование температурного поля, которое формирует один или несколько одинаковых газовых нагревателей на стальной пластине и получено его трехмерное графическое представление, по характеру которого, возможно сделать вывод о наличии различных дефектов.*

*Ключевые слова: цифровой фотоаппарат, газовый нагреватель, температурная лампа, абсолютно черное тело, дефект, тепловое излучение.*

*The article describes a method of using a digital camera during the procedure of active thermal control of metals that can be used in the energy, engineering, ferrous and non-ferrous metals for surface identification and internal defects of metallurgical products, in particular products manufactured by continuous casting and rolling products. By using the software Photoshop and MathCAD carried processing of the digital images of the thermal fields of metal plates created by sources of heating. Studies were performed using a digital camera Canon EOS 20D. The objects of study were selected steel plate (steel grade 08X18H10) and gas heater TORCH WS-503C. The study simulated the temperature field, which generates one or more identical gas heaters on a steel plate and received his three-dimensional graphic representation, the nature of which may infer the presence of various defects.*

*Keywords: digital camera, gas heater, temperature lamp, black body, defect, thermal radiation.*

**Вступ.** У багатьох галузях науки, які дослідження, контролю або управління. інтенсивно розвиваються, прогрес залежить від Зокрема, це теплоенергетика, теплові двигуни, вирішення проблеми вимірювання локальних металургія, електроніка, ракети і космічні густин теплових потоків на поверхнях об'єктів апарати, медицина, біологія, тепловимірвальні

прилади різного призначення: приймачі теплового випромінювання, вимірювачі теплових витрат промислових і житлових об'єктів, теплофізичних характеристик (ТФХ) матеріалів [1]. У більшості випадків при тепловому неруйнівному контролі (ТНК) використовується тепловізійна і пірометрична техніка, вартість якої на сьогоднішній день становить від 30 до 500 тис. грн. Однак у ході виробництва металопрокату або відливки (штампування) окремих виробів із різного роду металів температура нагрівання становить приблизно 600–2000°C, тобто максимум спектру теплового випромінювання зміщується в сторону видимої області, що в свою чергу, дає можливість використовувати цифровий фотоапарат (ЦФ) при проведенні теплового контролю (ТК) металів, вартість якого значно менша (2–10 тис. грн). Крім цього, матриці сучасних ЦФ мають вищу роздільну здатність, ніж матриці тепловізорів.

Запропонований спосіб використання ЦФ при проведенні процедури активного ТК металів практично не розглядається у наукових і періодичних виданнях в області ТНК і засобів вимірювання температури. Існує невелика кількість робіт, які показують можливість застосування даного способу і спрямовані на оцінку його метрологічних характеристик [2–8].

Формування теоретичних і експериментальних основ фотографічного методу активного ТК металів безумовно є актуальним завданням, що і зумовило мету роботи.

**Виклад основного матеріалу.** Модель активного теплового контролю [9,10] із використанням ЦФ, яка застосовувалась при дослідженнях, представлена на рис.1. Дана модель передбачає наявність джерела енергії, в якості якого використовувався газовий нагрівач TORCH WS-503С.

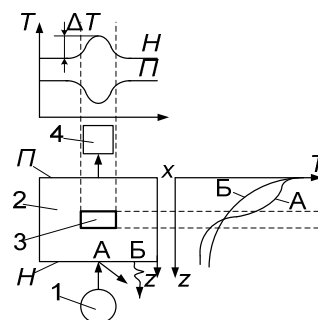
Використання ЦФ у якості первинного перетворювача (ПП) можливо завдяки приладу із зарядовим зв'язком – ПЗЗ-матриці, яка входить до його складу. ПЗЗ-матриця накопичує заряд, який пропорційний часу її експонування тепловим випромінюванням, що йде від теплового поля. Кожен субпіксель ПЗЗ-матриці являє собою осередок, над яким знаходиться світлофільтр, внаслідок чого даний осередок накопичує заряд для певного компонента кольору (червоного, зеленого або синього) світлового потоку. Потім даний накопичений заряд оцифровується за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) ЦФ (кількість ступенів квантування  $N_{\max}=2^8=256$ ) [11]. Перехід до яскравісної температури металу  $T_b$  можливо

здійснити, використовуючи функцію її взаємозв'язку з відносним значенням рівня червоного компоненту  $R$  зображення  $T_b=f(R)$ , яка встановлюється при проведенні процедури калібрування ЦФ, схематично представленої на рис. 2, а. У результаті, за відомою калібрувальною залежністю яскравісної температури металу  $T_b$  від отриманого значення  $R(T_b)=f(R)$  червоного компонента ПЗЗ-матриці ЦФ (рис. 2) здійснюють перехід до істинної температури об'єкта за наступною формулою [8]:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_b} + \frac{\lambda_0}{c_2} \ln h(\lambda_0, T), \quad (1)$$

де  $T$  – істинна термодинамічна температура металу, К;  $T_b$  – яскравісна температура металу, К;  $c_2 = 0,01439$  м·К – друга постійна Планка;  $\lambda_0$  – довжина хвилі, м;  $h(\lambda_0, T)$  – коефіцієнт випромінювання.

Експериментальні дослідження з використанням ЦФ Canon EOS 20D, основні технічні характеристики якого наведено в табл.1 [12], було проведено на кафедрі ІВТС НТУ «ХП». На об'єктів ЦФ (HELIOS 44М-4) попередньо було встановлено інтерференційний фільтр, характеристики якого наведені з його атестату в (табл. 2) для виділення довжини хвилі  $\lambda_0 = 650$  нм. ЦФ закріплений на штативі для запобігання вібрацій і підключений до персонального комп'ютера (ПК). При проведенні експерименту як джерело енергії використовувався газовий нагрівач (ГН) TORCH WS-503С, технічні характеристики якого також наведено в табл.1 [13].

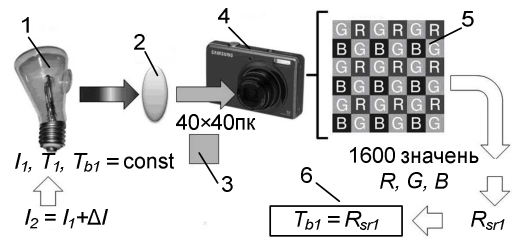


1 – джерело енергії; 2 – досліджуваний метал; 3 – дефект; 4 – цифровий фотоапарат; А – точка локального нагріву; Б – випромінююча точка поверхні металу що нагрівається; x – напрямок сканування джерела енергії з локальним впливом; z – напрямок вглиб металу; Н – поверхня металу, що нагрівається; П – प्रतिлежа поверхня металу; Т – температура

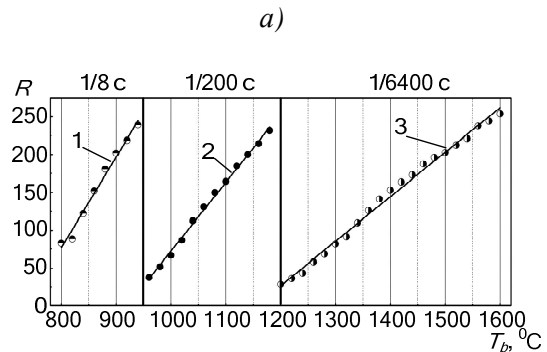
**Рисунок 1 - Модель активного теплового контролю**

ГН розташовано вертикально знизу до поверхні нагріву, у якості якої використовувався лист нержавіючої сталі марки 08X18H10 розмірами – 100×100 мм, товщиною – 1,5 мм. Відстань від ЦФ до поверхні фотографування становила 0,5 м (рис. 3, а). Металічна пластина (МП) з присутніми дефектами (рис. 3, б) (точковий – 1 ÷ 2 мм, (рис. 3, обл. 1); раковина – 8 ÷ 10 мм, (обл. 2); канавка – 1 ÷ 1,2 мм, довжина 50 мм, (обл. 3)) піддавалася нагріву до температури понад 600 °С. При цьому максимум спектру теплового випромінювання зміщувався в сторону видимої області, після чого проводилось її фотографування зверху і передача отриманих цифрових фотографій по дротяній або бездротяній лінії зв'язку на ПК, на якому відбувалися необхідні дії з обробки та систематизації даних. За допомогою програмного забезпечення комп'ютерного моделювання MathCAD встановлювалась тривимірна картина температурного поля  $f(R)$  на поверхні МП, по характеру якої можливо виявити внутрішні та зовнішні дефекти металу. На рис. 3, в представлена тривимірна картина температурного поля  $f(R)$  на поверхні МП, на якій видно температурні перепади, які збігаються з місцем розташування попередньо нанесених дефектів.

При проведенні процедури активного ТК МП більших геометричних розмірів необхідно отримати рівномірне нагрівання по її площі, використовуючи ряд точкових нагрівачів, для чого потрібно провести розрахунок їх кількості та відстані, на яку вони повинні бути віддалені один від одного. Для цього були проведені експериментальні дослідження з одним газовим нагрівачем. В результаті було отримано термофільм (20 зображень,  $\Delta t = 5$  с) теплового випромінювання МП (200×200 пікселів, 37 піксель/дюйм), яке формує один газовий нагрівач у процесі нагрівання листа нержавіючої сталі марки 08X18H10 розмірами – 500×500 мм, товщиною – 1,5 мм.



1 – електрична температурна лампа ТРВ 1100-2350; 2 – вузькосмуговий інтерференційний фільтр на довжину хвилі 650 нм; 3 – область зображення вольфрамової стрічки розмірами 40×40 пікселів; 4 – цифровий фотоапарат Canon EOS 20D; 5 – ПЗЗ (CCD) матриця цифрового фотоапарату Canon EOS 20D (схематично); 6 – рівняння  $T_b = Rsr$ , по яким встановлено функцію взаємозв'язку  $T_b = f(R)$



- 1 –  $T_b = (R + 881,7) / 1,2$  (для витримки фотографування  $\Delta t = 1/8$ с);  
 2 –  $T_b = (R + 835,1) / 0,9$  (для витримки фотографування  $\Delta t = 1/200$ с);  
 3 –  $T_b = (R + 678,9) / 0,6$  (для витримки фотографування  $\Delta t = 1/6400$ с)

б)

Рисунок 2 - Процедура калібрування ЦФ (а) та вигляд отриманих калібрувальних залежностей  $T_b = f(R)$  (б)

Таблиця 1 - Технічні характеристики ЦФ Canon EOS 20D та нагрівача TORCH WS-503C

| Технічні характеристики ЦФ Canon EOS 20D |   | Технічні характеристики TORCH WS-503C |              |
|--|---|---------------------------------------|--------------|
| Пікселі                                  | Ефективна кількість 8,2 Мпк               | Паливо                                | Газ бутан    |
| Розмір файлу                             | Формат RAW – прибіл. 8,7 Мб (3504×2336пк) | Діаметр горілки                       | 39 мм        |
| Кольорова палітра                        | sRGB, AdobeRGB                            | Номінальна теплова потужність         | 1,65 кВт     |
| Коригування колірної температури         | ±9 ступенів з кроком в повну ступень      | Споживання газу                       | 80 г/год     |
| Чутливість ISO                           | 100 – 3200                                | Максимальна температура нагріву       | 1300 °С      |
| Витримки затвору                         | 1/8000 с – 30 с                           | Висота сфокусованого полум'я          | (10 – 50) мм |

Таблиця 2 - Атестаційні характеристики інтерференційного фільтра

|                 |             |                     |       |
|-----------------|-------------|---------------------|-------|
| Довжина хвилі   | (650±10) нм | Пропускання (макс.) | 75 %  |
| Напівширина, нм | <12 нм      | Діаметр             | 20 мм |

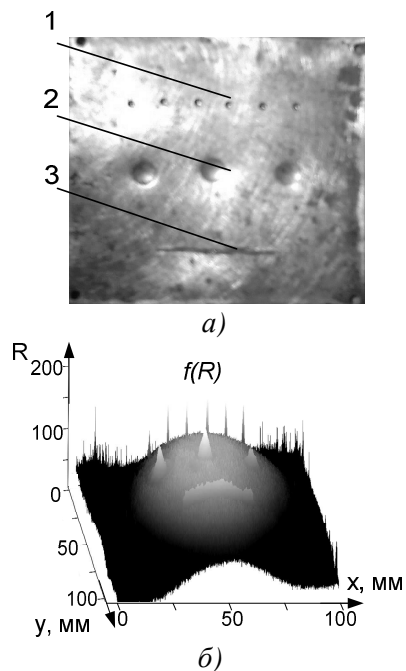


Рисунок 3 – Розміщення дефектів на пластині із нержавіючої сталі марки 08X18H10

Подальша обробка цих зображень за допомогою вбудованої функції *READ\_RED* програмного середовища MathCAD [14] дозволила отримати просторову (двовірну)  $x, y = M[R]$  та одновірну  $x = M[R]$  матриці реальних значень рівня червоного компоненту –  $R$  файлів зображень МП, де  $x, y$  – просторові координати, вказані у пікселях (пк) (рис. 4).

Для переведення значень  $x, y$  вказаних у пікселях у значення у метрах необхідно помножити їх на перевідний коефіцієнт  $K = 0,307 \cdot 10^{-3}$  м/пк. Значення коефіцієнту отримано виходячи із значення масштабу фотографування який становив 1:2,23 при розташуванні ЦФ на відстані 0,5 м від поверхні фотографування. Графічне представлення розподілення рівня червоного компоненту –  $R$  зображень МП наведено на рис. 4.

Встановлено, що існує можливість моделювання температурного поля поверхні МП за допомогою двовірної (2) та одновірної (3) функцій щільності ймовірності нормального закону розподілення:

$$f(x, y) = k \left[ \left( \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma^2}\right) \right) \left( \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-\mu_2)^2}{2\sigma^2}\right) \right) \right], \quad (2)$$

$$f(x) = k \left[ \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \right], \quad (3)$$

де  $\mu, \mu_1, \mu_2$  – математичне очікування, яке характеризує місце розташування нормального закону на поверхні, пк;  $\sigma$  – дисперсія розподілення, пк;  $k$  – масштабний коефіцієнт.

Реалізація методу найменших квадратів [15] дозволила встановити параметри функції щільності ймовірності нормального закону розподілення ( $\mu, \mu_1, \mu_2, \sigma, k$ ) при виконанні умови найкращої апроксимації розподілення реальних значень рівня червоного компоненту –  $R$  зображення МП.

Моделювання було проведено за допомогою використання вбудованої функції щільності ймовірності нормального закону розподілення – *dnorm* ( $x, \mu, \sigma$ ) програмного середовища MathCAD для випадку  $t = 100$  с [14]. Вигляд функцій  $f(x, y)$  та  $f(x)$ , які записані згідно синтаксису програмного середовища MathCAD, та їх графічного зображення представлено на рис. 5,а та рис. 5,б відповідно.

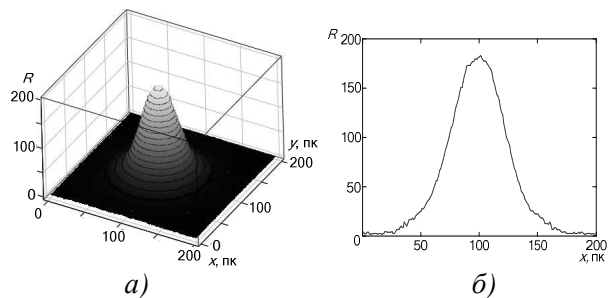
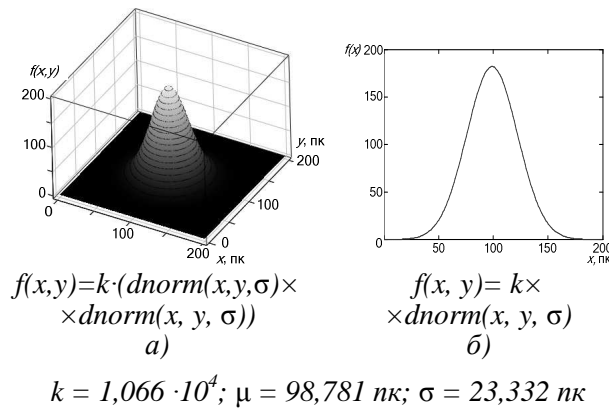


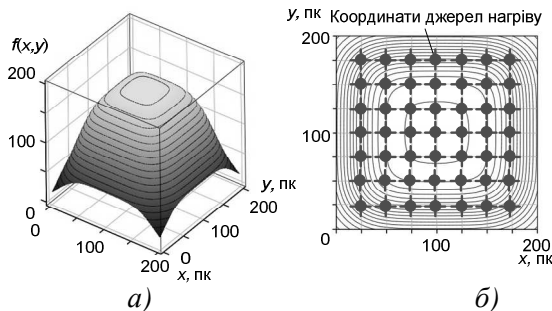
Рисунок 4 - Графічне зображення просторового (а) та одновірного (б) розподілення реальних значень рівня червоного компоненту –  $R$  зображення МП в момент часу  $t = 100$  с

Розроблено алгоритм у програмному середовищі MathCAD, який дозволяє моделювати температурні поля на поверхні МП від  $n$ -ї кількості ідентичних за параметрами ГН у динамічному режимі нагрівання при попередньому аналізі температурного поля від одного ГН за допомогою методики, яка описана вище. Даний алгоритм дозволяє підібрати їх кількість та відстань між ними для отримання

рівномірного температурного поля на поверхні МП від її заданих геометричних розмірів. На рис. 6,а представлений результат моделювання температурного поля від 49-ти однакових ГН в момент часу  $t = 100$  с, які були розташовані за наступною схемою (рис. 6,б).



**Рисунок 5 – Моделювання температурного поля поверхні МП за допомогою просторової (а) та одновірної (б) функцій щільності ймовірності нормального закону розподілення в момент часу  $t = 100$  с**



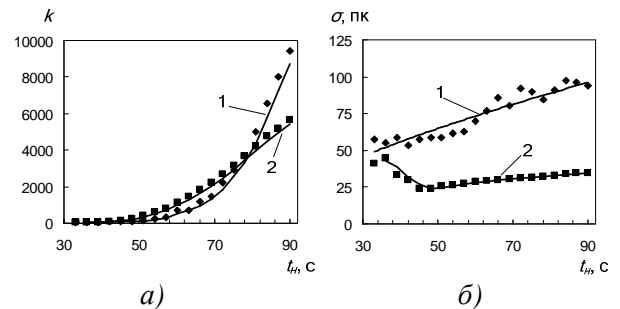
**Рисунок 6 – Моделювання температурного поля поверхні МП в залежності від  $n$ -ї кількості однакових ГН**

При моделюванні температурного поля поверхні МП від одного ГН за допомогою одновірної функцій щільності ймовірності нормального закону розподілення були розраховані значення масштабного коефіцієнту  $k$  та дисперсії  $\sigma$  в кожний момент часу  $t$  (табл. 3). Математичне очікування  $\mu$ , характеризує місце розташування ГН під поверхнею нагріву. Тому це значення майже не змінюється та в табл. 3 не вказано. Окрім цього, за допомогою розробленого алгоритму було обчислене значення приведеної похибки апроксимації  $\gamma_{анр}$  рівня червоного компоненту

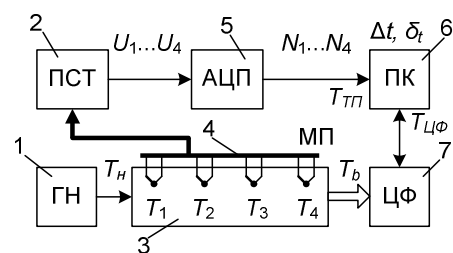
зображення реального теплового випромінювання МП від одного ГН математичною функцією щільності ймовірності нормального закону розподілення (3) для кожного моменту часу  $t$ , яке також наведено в табл. 3.

Окрім цього, було встановлено характер зміни масштабного коефіцієнту  $k$  (рис. 7,а) та дисперсії  $\sigma$  (рис. 7,б) від часу нагрівання  $t_n$  в інтервалі від 33 с до 90 с у випадку із одним нагрівачем для різного роду металів (крива 1 – мідь 99,98%, крива 2 – залізо 99,89%). Розміри МП становили  $65 \times 65$  мм, товщина 2 мм, інтервал зйомки  $\Delta t = 3$  с.

Аналіз абсолютної  $\Delta T$  та відносної  $\delta_T$  методичних похибок вимірювання температури МП було здійснено за допомогою відповідної схеми (рис. 8). В ході проведення експерименту МП піддавалася послідовно статичному нагріванню за допомогою ГН до температур  $690^\circ\text{C}$ ,  $815^\circ\text{C}$  та  $950^\circ\text{C}$ .



**Рисунок 7 – Графіки функцій залежності масштабного коефіцієнту  $k = f(t_n)$  (а) та дисперсії  $\sigma = f(t_n)$  (б) при динамічному нагріванні зразків міді та заліза**



1 – газовий нагрівач; 2 – 4-х канальний підсилювач сигналів термопар; 3 – металева пластина; 4 – вимірювальні термоелектричні перетворювачі (термопари, тип К, хромель-алюмель); 5 – 10-ти розрядний аналого-цифровий перетворювач; 6 – персональний комп'ютер; 7 – цифровий фотоапарат

**Рисунок 8 - Схема аналізу абсолютної  $\Delta T$  та відносної  $\delta_T$  методичних похибок вимірювання температури МП**

Таблиця 3 – Значення масштабного коефіцієнту  $k$ , дисперсії  $\sigma$  та приведеної похибки апроксимації  $\gamma_{\text{апр}}$ 

| Параметри розподілення                         | Моменти часу нагрівання $t_n$ , с |              |              |              |              |              |              |              |              |               |
|--|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
|  | $t_n = 10$ с                      | $t_n = 20$ с | $t_n = 30$ с | $t_n = 40$ с | $t_n = 50$ с | $t_n = 60$ с | $t_n = 70$ с | $t_n = 80$ с | $t_n = 90$ с | $t_n = 100$ с |
| Масштабний коефіцієнт $k \cdot 10^4$           | 0,191                             | 0,229        | 0,342        | 0,411        | 0,460        | 0,486        | 0,508        | 0,523        | 0,530        | 0,543         |
| Дисперсія $\sigma$ , пк                        | 20,797                            | 20,825       | 21,164       | 21,555       | 22,114       | 22,560       | 22,742       | 22,970       | 23,040       | 23,438        |
| Похибка апроксимації $\gamma_{\text{апр}}$ , % | -1,632                            | -1,287       | -1,068       | -1,026       | -1,210       | -0,968       | -0,864       | -0,989       | -0,814       | -1,233        |

Виходячи із проведених експериментальних досліджень, за допомогою програмного забезпечення LabVIEW [16] було встановлено, що абсолютна похибка вимірювання температури  $\Delta T = T_{\text{ЦФ}} - T_{\text{ТТ}}$  знаходиться в інтервалі від  $-6,95$  °С до  $-0,13$  °С, а відносна  $\delta_T = \Delta T \cdot 100\% / T_{\text{ТТ}}$  в інтервалі від  $-1,0$  % до  $-0,01$  %.

## ВИСНОВКИ

Показана можливість застосування цифрового фотоапарату в якості реєструючого пристрою теплового випромінювання при активному ТНК металів. Проведено аналіз тривимірної картини температурного поля, по вигляду якої, виявлено присутні в металі дефекти. Проаналізовано тривимірну картину температурного поля на поверхні металеві пластини, яке формує один газовий нагрівач на МП та здійснено просторове моделювання за допомогою програми MathCAD зовнішнього вигляду тривимірної картини температурного поля, яке формує  $n$  таких нагрівачів. Слід зазначити, що існує також можливість встановити теплофізичні параметри матеріалу, нагрів якого здійснюється за допомогою газового нагрівача за допомогою залежності масштабного коефіцієнту  $k$  і дисперсії  $\sigma$  від часу нагрівання  $t_n$ . Тому подальші дослідження слід спрямувати на встановлення цих залежностей при динамічному режимі нагрівання (охолодження). Також необхідно доопрацювати алгоритм моделювання температурних полів для автоматичного розрахунку кількості нагрівачів і місць їх розташування, виходячи із параметрів одного нагрівача та геометричних розмірів металеві пластини.

1. Пилипенко Н.В. Методи и приборы нестационарной теплотри на основе

решения обратных задач теплопроводности, – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 180 с. 2. Dong Liu, Fei Wang, Kefa Cen. Noncontact temperature measurement by means of CCD cameras in a participating medium. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. Optics Letters, Vol. 33, Issue 5, 2008. P. 422-424. 3. Pavel L. Komarov, Mihai G. Burzo. CCD thermoreflectance thermography system: methodology and experimental validation. Nanoscale Electro-Thermal Sciences Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Southern Methodist University Dallas, TX 75275-0337, U.S.A, THERMINIC, 2006. 4. P. Saunders. Developing an imaging radiation thermometer. Measurement Standards Laboratory, Industrial Research Ltd, PO Box 31-310, Lower Hutt. Automation and control. 1998.P. 16-19. 5. R.G. Keanini, C.A. Allgood. Measurement of time varying temperature fields using visible imaging CCD cameras. Department of Mechanical Engineering and Engineering Science. Int. Corona HeatMass Transfer, Vol. 23, No. 3, 1996.P. 305-314. 6. Arpit Patel. Temperature measurement of a candle flame using a CCD camera. University of Kent. Department of electronics. 2009. – 50 p. 7. Jignesh D. Maun. Thin-filament pyrometry with a digital still camera. University of Maryland. 2006. – 37 p. 8. Ракчеева Л.П. Измерение температуры нагретых тел с высоким пространственным разрешением с помощью цифрового фотоаппарата. Методическое пособие. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://ckp.lab2.phys.spbu.ru>. 9. Давиденко О.П. Вимірювання яскравісної та радіаційної температури об'єктів за допомогою цифрового фотоапарата / О.П. Давиденко, В.М. Славков // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XX міжнародної

- науково-практичної конференції, Ч.ІІ (15-17 травня 2012 р., Харків) / за ред. проф. Товажнянського Л.Л. – Харків, НТУ «ХПИ». – С. 105.
10. *Незрушаючий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль./В.П. Вавилов. – М.: Машиностроение, 2004. – 679 с.*
11. *Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 264с.*
12. *Canon EOS 20D. Инструкция по эксплуатации, – © CANON INC. 2004. – 168с.*
13. *Mirco multi purpose butane gas torch WS-503C. Электронный ресурс. Режимдоступа: <http://www.hisupplier.com/product-826813-Mirco-multi-purpose-butane-gas-torch-WS-503C>.*
14. *Гурский Д.А., Турбина Е.С. Вычисления в MathCAD12. – СПб.: Питер, 2006. – 544с.*
15. *Гайдышев И. Анализ и обработка данных. – СПб.: Питер, 2001. – 750с.*
16. *Федосов В.П., Нестеренко А.К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW: учеб. пособие / под ред. В.П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 456 с.*
17. *DPI 880 - Multifunction Calibrator. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.getmcs.com/en/pressure-and-level/handheld-test-tools/dpi-880.html>.*
18. *Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования. ГОСТ 23483-79. – [Действующий от 01.01.1980] – М.: Издательство стандартов, 1985. – 15 с.*

**Поступила в редакцію 10.11.2014р.**

**Рекомендували до друку: докт. техн. наук, проф. Стороженко В.А., докт. техн. наук, проф. Заміховський Л.М.**