



ТЕПЛОВИЙ НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА СПОСІБ ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ НА МЕТАЛЕВИХ ПЛАСТИНАХ

В. М. СЛАВКОВ, О. П. ДАВИДЕНКО

Нац. техн. ун-т «ХПИ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21. E-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua

Розглянуто спосіб теплового неруйнівного 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. Здійснено аналіз теплових полів металевих пластин з присутніми в них дефектами різного виду та теплових полів джерел нагріву. Дослідження проводили з використанням цифрового фотоапарату Canon EOS 20D з подальшою обробкою цифрових фотографій за допомогою програмних середовищ Photoshop та MathCAD та просторовою візуалізацією отриманих результатів. Об'єктами дослідження було обрано сталеві пластини (марка сталі 08X18H10) та газовий нагрівач TORCH WS-503C. В результаті проведення досліджень були отримані математичні моделі теплового випромінювання, яке формує газовий нагрівач TORCH WS-503C та тривимірний вигляд функції інтенсивності червоного каналу $f(R)$ зображення теплового випромінювання сталеві пластини з дефектами, по характеру якої можливо провести їх ідентифікацію. Бібліогр. 8, табл. 2, рис. 11.

Ключові слова: тепловий неруйнівний контроль, газовий нагрівач, температурна лампа, абсолютно чорне тіло, дефект, металева пластина, теплове випромінювання

У теплових методах неруйнівного контролю в якості пробної використовується тепла енергія, що поширюється в об'єкті контролю. Температурне поле поверхні об'єкта є джерелом інформації про особливості процесу теплопередачі, які, в свою чергу, залежать від наявності внутрішніх або зовнішніх дефектів, умов теплообміну з навколишнім середовищем, геометричних і теплофізичних характеристик об'єкта. У багатьох галузях науки, які інтенсивно розвиваються, прогрес залежить від вирішення проблеми вимірювання локальних густин теплових потоків на поверхнях об'єктів дослідження, контролю або управління. Зокрема, це теплоенергетика, теплові двигуни, металургія, електроніка, ракети і космічні апарати, медицина, біологія, тепловимірювальні прилади різного призначення: приймачі теплового випромінювання, вимірювачі теплових витрат промислових і житлових об'єктів, теплофізичних характеристик (ТФХ) матеріалів [1].

При здійсненні теплового НК та способу формування теплових полів на металевих пластинах (МП) в якості первинного перетворювача (ПП) використовується цифровий фотоапарат (ЦФ), попереднє калібрування якого здійснюється за допомогою еталона абсолютно чорного тіла (АЧТ) [2]. Проте, окрім безпосереднього вимірювання температури досліджуваного металу, була розглянута можливість встановлення присутніх в металі дефектів, що, в свою чергу, дозволило дослідити параметри теплового випромінювання одного

газового нагрівача (ГН) та здійснити просторове моделювання теплового випромінювання від n -ї кількості таких нагрівачів.

Мета роботи – подальший розвиток методу дистанційного контролю теплових полів об'єктів за допомогою ЦФ, вивчення похибок і невизначеності на основі аналізу отриманих експериментальних даних.

Теоретичні й експериментальні дослідження. Наявність дефектів призводить до локального або інтегрального викривлення теплового поля, характерного для даного металу. Це виражається у появі перепадів температури. Просторово-часова функція цих перепадів визначається температурою металу, умовами його теплообміну з навколишнім середовищем, геометричними і теплофізичними характеристиками металу і самих дефектів, а також часом у динамічному режимі [3]. Модель активного теплового контролю з використанням ЦФ, яка застосовувалась при дослідженнях, представлена на рис. 1. Дана модель передбачає наявність джерела енергії, в якості якого використовувався ГН TORCH WS-503C. Дефект, який присутній в металі, робить значний опір тепловому потоку, який, поширюючись вглиб металу, обтікає дефект оточуючими шарами металу. При цьому має місце накопичення тепла в шарі до дефекту і його недолік в шарі за ним, що проявляється в локальному підвищенні температури поверхні H , яка нагрівається, і зниженні на протилежній нагріванню поверхні L . Іноді кажуть, що дефект

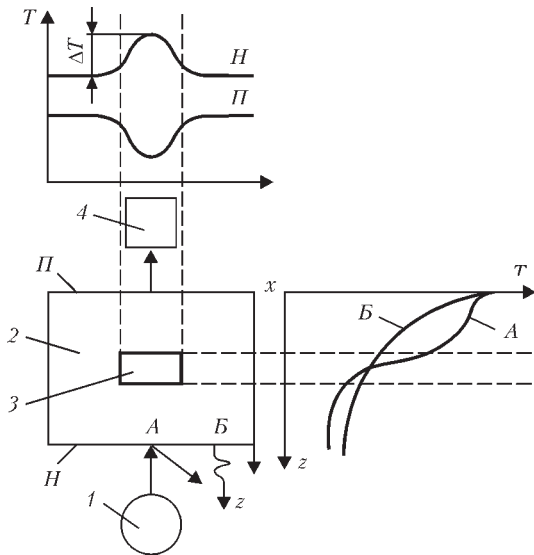


Рис. 1. Модель активного теплового контролю з використанням ЦФ: 1 – джерело енергії; 2 – досліджуваний метал; 3 – дефект; 4 – ЦФ; А – точка локального нагріву; Б – випромінююча точка поверхні металу, що нагрівається; x – напрямок сканування джерела енергії з локальним впливом; z – напрямок вплиб металу; T – температура відображає тепловий потік на поверхню H і затінює його на поверхні П.

Використання ЦФ у якості ПП можливо завдяки приладу із зарядовим зв'язком – ПЗЗ-матриці, яка входить до його складу. ПЗЗ-матриця накопичує заряд, пропорційний часу її експонування тепловим випромінюванням, що йде від теплового поля, утвореного ГН. 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 (рис. 2, а). Потім даний накопичений заряд

оцифровується за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) ЦФ (кількість ступенів квантування $N = 2^8 = 255$) [4]. Перехід до яскравісної температури металу T_b можливо здійснити, використовуючи функцію її взаємозв'язку з відносним значенням рівня червоного каналу R зображення $T_b = f(R)$, яка встановлюється при проведенні процедури калібрування ЦФ схематично представленої на рис. 2, б.

Експериментальні дослідження з використанням ЦФ Canon EOS 20D, основні технічні характеристики якого наведено в табл. 1 [5], було проведено на кафедрі ІВТС НТУ «ХП» в спеціалізованій лабораторії. На об'єктив ЦФ (HELIOS 44M-4) попередньо було встановлено інтерференційний фільтр, для виділення довжини хвилі $\lambda = 610$ нм, потім ЦФ закріплювався на штативі для запобігання вібрацій і підключався до персонального комп'ютера (ПК).

При проведенні експерименту використовувався ГН TORCH WS-503С, технічні характеристики якого також наведено в табл. 1 [6]. ГН було розташовано вертикально 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). МП з присутніми дефектами (рис. 3, б) (точковий – 1...2 мм, рис. 3, область 1; раковина 8...10 мм, область 2; канавка 1...1,2 мм, довжина 50 мм, область 3) піддавалася нагріву до температури видимого діапазону спектра, після чого проводилось її фотографування і передача отриманих цифрових фотографій по дротяній або бездротяній лінії зв'язку на ПК, на якому відбувалися необ-

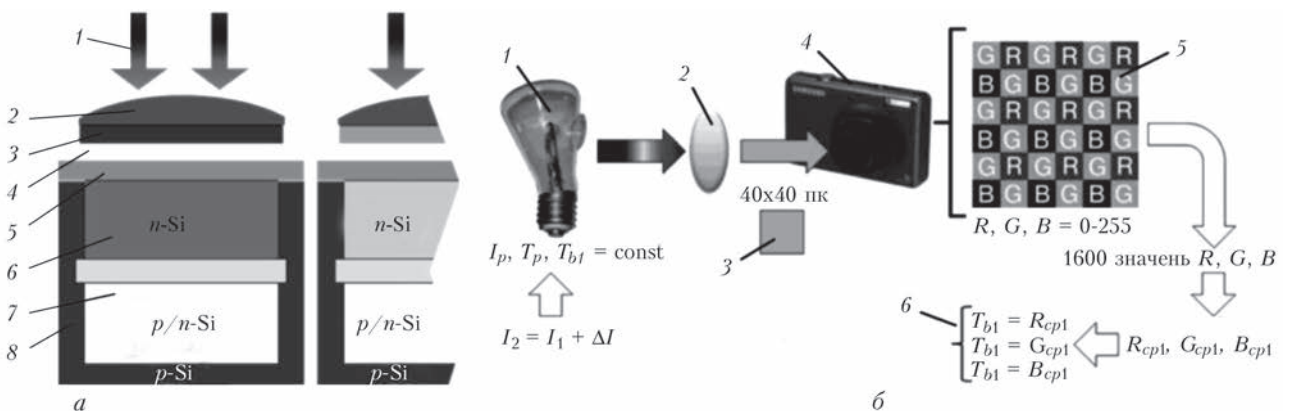


Рис. 2. Структурна схема складу субпікселя ПЗЗ-матриці ЦФ (а) та процедура його калібрування (б): для а – 1 – фотони світла; 2 – мікролінза субпікселя; 3 – R – червоний світлофільтр субпікселя, фрагмент фільтра Байєра; 4 – прозорий електрод з полікристалічного кремнію або сплаву індію та оксиду олова; 5 – оксид кремнію; б – кремнієвий канал n-типу: зона генерації носіїв – зона внутрішнього фото ефекту; 7 – зона потенційної ями, де збираються електрони із зони генерації носіїв заряду; 8 – кремнієва підкладка p-типу; для б – 1 – електрична температурна лампа ТРВ 1100-2350; 2 – вузькосмуговий інтерференційний фільтр на довжину хвилі 610 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; б – матриці рівнянь $T_b = R_{cp1}$, по яким встановлено функцію взаємозв'язку $T_b = f(R)$, тобто $T_b = (R + 881,68)/1,1981$ (для $\Delta t = 1/8$ с), $T_b = (R + 835,14)/0,9075$ (для $\Delta t = 1/200$ с), $T_b = (R + 678,88)/0,588$ (для $\Delta t = 1/6400$ с)



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

ЦФ Canon EOS 20D		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 мм ... 50мм

хідні дії з обробки та систематизації даних. За допомогою програмного забезпечення комп'ютерного моделювання встановлювався візуальний тривимірний вигляд функції інтенсивності червоного каналу $f(R)$ зображення теплового випромінювання МП, по характеру якої можливо ідентифікувати внутрішні та зовнішні дефекти металу. На рис. 3, б, в представлені зображення МП з присутніми дефектами та тривимірна функція інтенсивності червоного каналу $f(R)$ зображення теплового випромінювання МП відповідно.

Експериментальні дослідження теплового випромінювання ГН проводили дистанційно за допомогою програми EOS Utility [5], яка входить до складу програмного забезпечення ЦФ, обсяг серійної зйомки становив 20 кадрів, інтервал часу зйомки $t_{зйомки} = 5$ с. На ЦФ встановлювались наступні параметри зйомки: витримка 0,6 с; діафрагма F2,0; чутливість ISO – 100; баланс білого (колірна температура) 6500 К; формат файлу зображення RAW; режим виміру експозиції – TTL вимір при повністю відкритій діафрагмі за допомогою 35-зонного кремнієвого фотоелемента. В результаті було отримано 20 зображень теплового випромінювання МП (200×200 пікселів,

37 піксель/дюйм), яке формує ГН, в процесі нагрівання листа нержавіючої сталі марки 08X18H10, розмірами 500×500 мм, товщиною 1,5 мм (рис. 4).

Подальша обробка цих зображень за допомогою вбудованої функції *READ_RED* (файл зображення) програмного середовища MathCAD [7] дозволила отримати просторову (двомірну) $x, y = M[R]$ та одномірну $x = M[R]$ матриці реальних значень рівня червоного каналу – R файлів зображень, де x, y – просторові координати, вказані у пікселях (пк) (рис. 5). Для переведення значень x, y (вказаних у пікселях) в метри, необхідно помножити їх на перевідний коефіцієнт $K = 0,0254/B$, де B – роздільна здатність зображення, піксель/дюйм.

Встановлено, що графічне зображення просторового (рис. 5, а) та одномірного (рис. 5, б) розподілення реальних значень рівня червоного каналу – R зображення відображає двомірну (1) та одномірну (2) функцію щільності ймовірності нормального закону розподілення, тому далі була проаналізована можливість отримання просторової та одномірної моделей теплового випромінювання ГН за допомогою цієї функції:

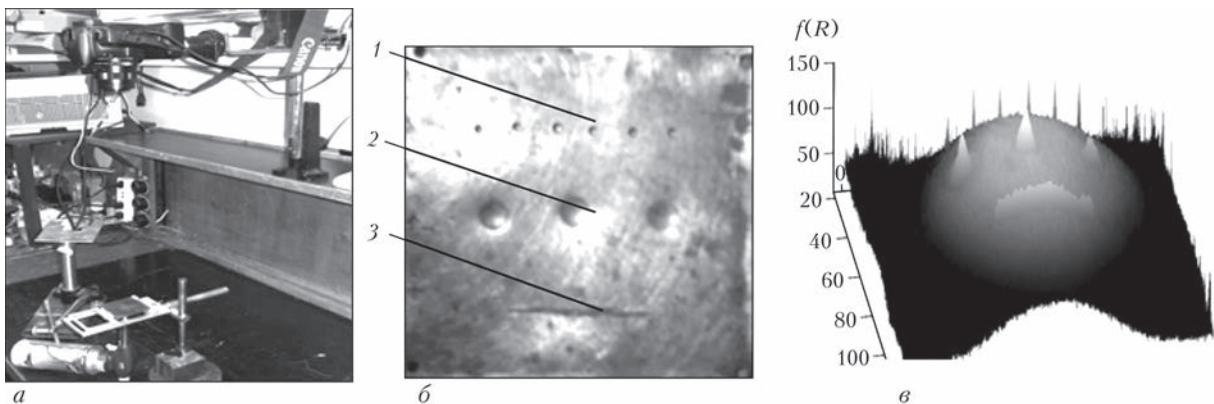


Рис. 3. Встановлення дефектів пластини із нержавіючої сталі марки 08X18H10 (позначення а–в див. у тексті)

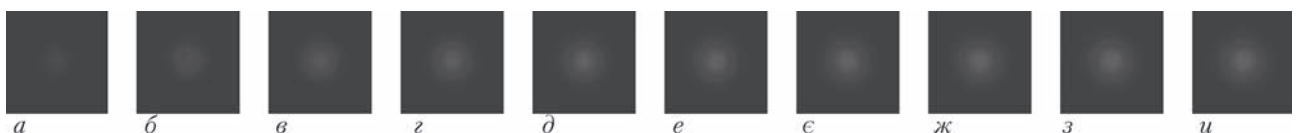


Рис. 4. Зображення теплового випромінювання, сформоване ГН у різні моменти часу нагрівання t_n : а – $t_n = 10$ с; б – 20; в – 30; г – 40; д – 50; е – 60; є – 70; ж – 80; з – 90; и – 100

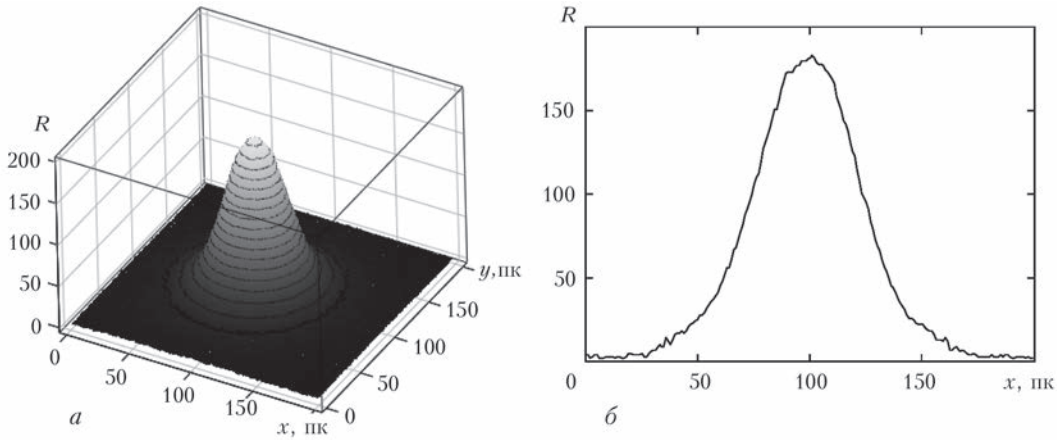


Рис. 5. Графічне зображення просторового (а) та одновимірного (б) розподілення реальних значень рівня червоного каналу – R зображення теплового випромінювання ГН в момент часу $t = 100$ с

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

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

де μ, μ_1, μ_2 – математичне очікування, характеризує місце розташування нормального закону на поверхні, пк; σ – дисперсія розподілення, пк; k – масштабний коефіцієнт.

Реалізація методу найменших квадратів [8] 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 каналу – R зображення. Моделі було отримано за допомогою використання вбудованої функції щільності ймовірності нормального закону розподілення – `dnorm(x, mu, sigma)` програмного середовища MathCAD для випадку $t = 100$ с [7].

Остаточний вигляд функцій $f(x, y)$ та $f(x)$, які записані згідно синтаксису програмного середовища MathCAD та їх графічного зображення представлено на рис. 6.

На основі проведених досліджень було розроблено алгоритм у програмному середовищі MathCAD, який дозволяє моделювати теплові випромінювання від n -ї кількості ідентичних за параметрами ГН в динамічному режимі нагрівання, при попередньому аналізі теплового випромінювання від одного ГН за допомогою методики, яка описана вище. Алгоритм включає функції зчитування файлів зображення; функції обробки та візуального відображення отриманих теплових випромінювань; функції пошуку параметрів нормального закону розподілення по методу найменших квадратів; функції графічного відображення отриманої математичної моделі від n -ї кількості ГН; функції аналізу та розрахунку похибок апроксимації реальних теплових випромінювань нагрівачів їх моделями. Використання програми EOS Utility [5] дозволило автоматизувати процес фотографування динамічного теплового випромінювання ГН та прискорити процес аналізу отриманих даних. Розроблений алгоритм частково на-

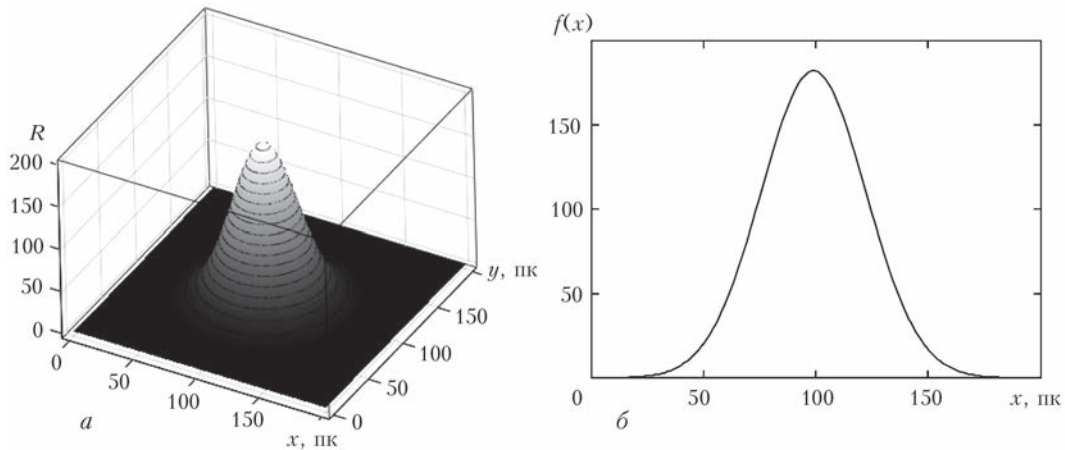


Рис. 6. Графічне зображення просторової (а) та одновимірної (б) математичних моделей функції щільності ймовірності нормального закону розподілення в момент часу $t = 100$ с ($k = 1,066 \cdot 10^4$; $\mu = 98,781$ пк; $\sigma = 23,332$ пк): а – $f(x, y) = k \cdot \text{dnorm}(x, \mu, \sigma) \cdot \text{dnorm}(y, \mu, \sigma)$; б – $f(x) = k \cdot \text{dnorm}(x, \mu, \sigma)$

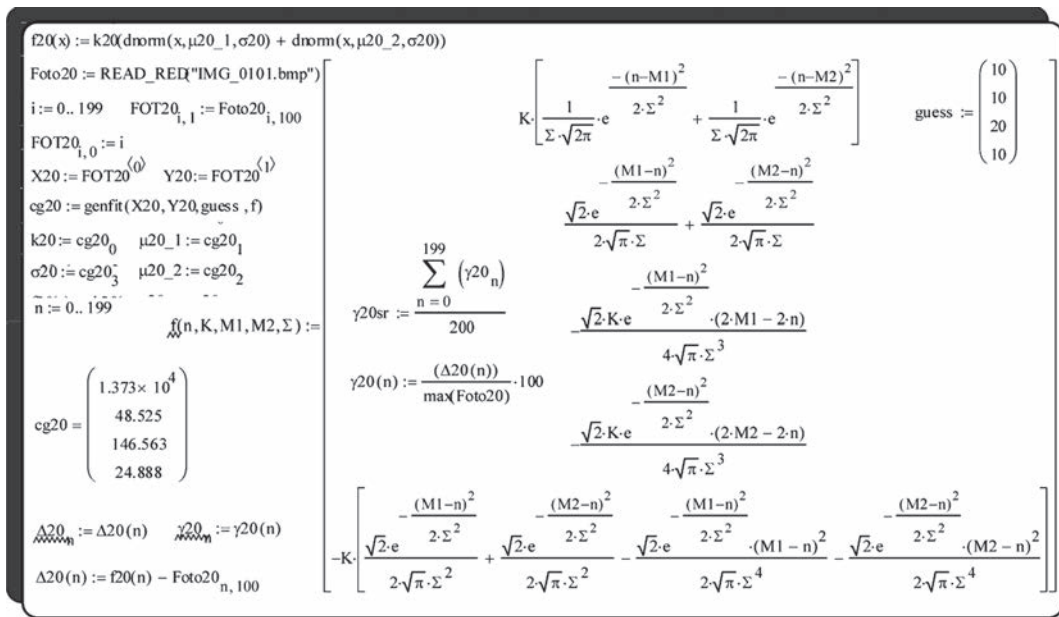


Рис. 7. Скорочене представлення алгоритму просторового моделювання теплових випромінювань ГН

ведено на рис. 7, тому що він включає фрагменти, які повторюються в залежності від кількості файлів зображень теплового випромінювання нагрівача.

В результаті обробки зображень теплового випромінювання від двох ГН було отримано графічне зображення просторового розподілення в момент часу $t_{10} = 100$ с (рис. 8, а) та сімейство кривих одномірного розподілення реальних значень рівня червоного каналу – R в моменти часу $t_1 = 10$ с, $t_2 = 20$ с, ..., $t_{10} = 100$ с, $\Delta t = 10$ с (рис. 8, б).

В результаті моделювання теплового випромінювання від двох газових нагрівачів за допомогою розробленого алгоритму було отримано графічне зображення просторової в момент часу $t_{10} = 100$ с (рис. 9, а) та сімейство кривих одномірної в моменти часу $t_1 = 10$ с, $t_2 = 20$ с, ..., $t_{10} = 100$ с, $\Delta t = 10$ с (рис. 9, б) математичних моделей.

Значення масштабного коефіцієнта k та дисперсії σ для одномірної математичної моделі теплового випромінювання від двох ГН в кожний момент часу t представлені у табл. 2. Як вже було

зазначено, математичне очікування μ характеризує місце розташування ГН під поверхнею нагріву, тому це значення майже не змінюється та в табл. 2 не вказано. Окрім цього, за допомогою розробленого алгоритму було обчислене значення приведеної похибки апроксимації $\gamma_{\text{апр}}$ реального теплового випромінювання від двох нагрівачів їх моделями для кожного моменту часу t , яке також наведено в табл. 2.

Розроблений алгоритм просторового моделювання теплових випромінювань джерел нагріву є універсальним і дає змогу моделювати складні теплові поля від n -ї кількості джерел нагріву. На рис. 10 представлені теплові поля від чотирьох (а) та восьми (б) однакових джерел нагріву, розташованих за наступними схемами (рис. 10, б, з).

За отриманими даними (див. табл. 2) було встановлено характер зміни масштабного коефіцієнта k (рис. 11, а) та дисперсії σ (рис. 11, б) для випадку із двома нагрівачами. Слід зазначити, що існує також можливість встановити теплофізичні параме-

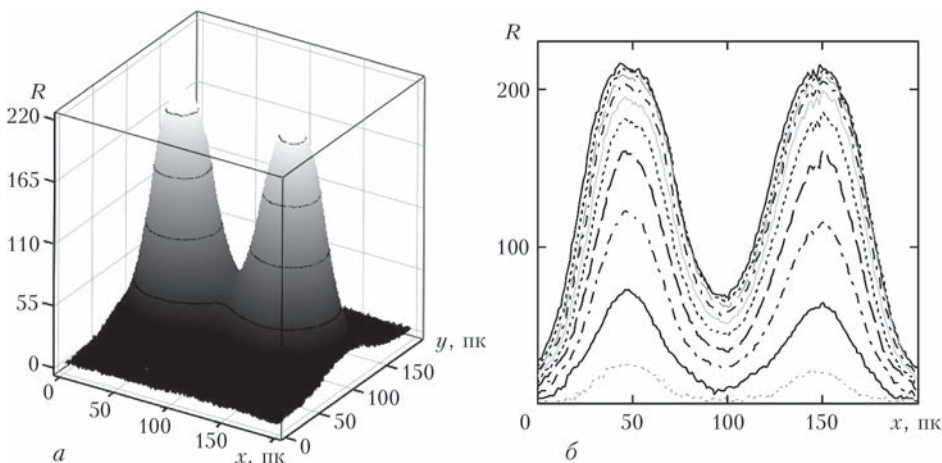


Рис. 8. Графічне зображення просторового ($t_{10} = 100$ с) (а) та одномірного ($t_1 = 10$ с, $t_2 = 20$ с, ..., $t_{10} = 100$ с, $\Delta t = 10$ с) (б) розподілення реальних значень рівня червоного каналу – R зображень теплового випромінювання від двох ГН



Т а б л и ц я 2. Значення масштабного коефіцієнта k , дисперсії σ , приведеної похибки апроксимації $\gamma_{\text{апр}}$

Параметри розподілення	Моменти часу нагрівання $t_n, \text{с}$									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Масштабний коефіцієнт $k \cdot 10^4$	0,091	0,313	0,586	0,824	1,003	1,132	1,218	1,284	1,332	1,373
Дисперсія σ , пк	16,066	19,425	20,420	21,289	22,195	22,959	23,608	24,127	24,544	24,888
Похибка апроксимації $\gamma_{\text{апр}}, \%$	-1,326	-0,261	-0,260	-0,148	0,024	0,120	0,174	0,203	0,227	0,220

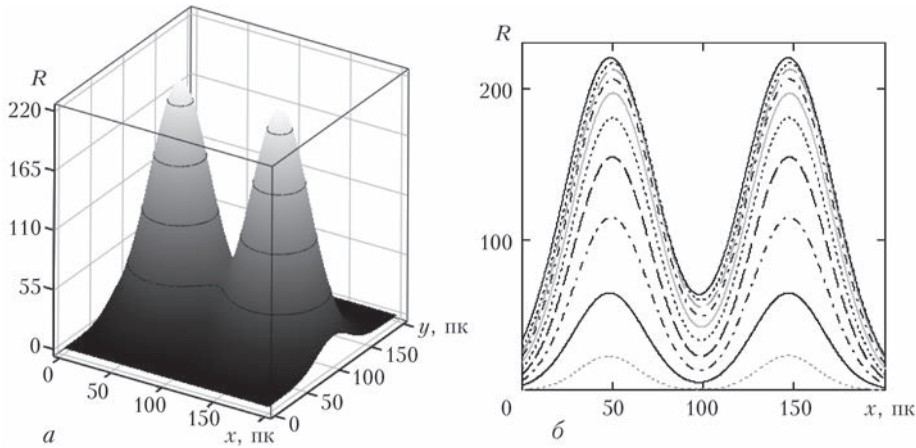


Рис. 9. Графічне зображення просторової ($t_{10} = 100 \text{ с}$) (а) та одновимірної ($t_1 = 10 \text{ с}, t_2 = 20 \text{ с}, \dots, t_{10} = 100 \text{ с}, \Delta t = 10 \text{ с}$) (б) математичних моделей теплового поля від двох ГН

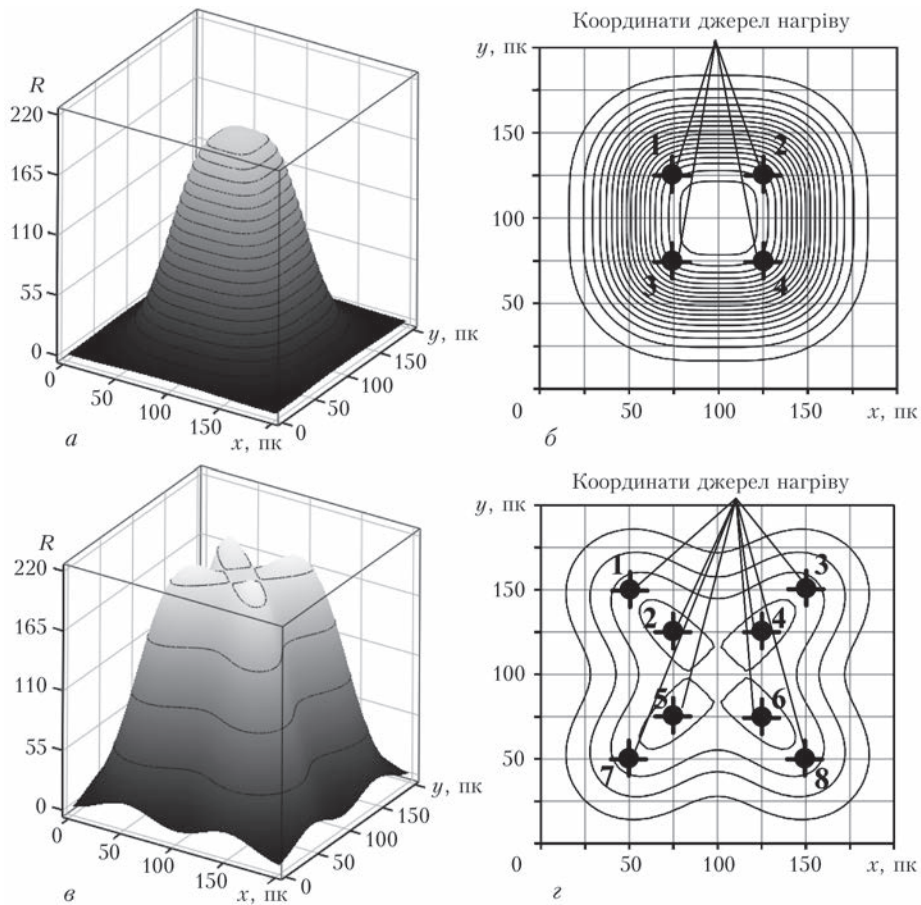


Рис. 10. Графічне зображення просторових моделей теплових полів від n -ї кількості однакових джерел нагріву: а, в – модель теплового поля від чотирьох (а) та восьми (в) джерел нагріву; б, г – схема розташування відносно для чотирьох (б) та восьми (г) джерел нагріву

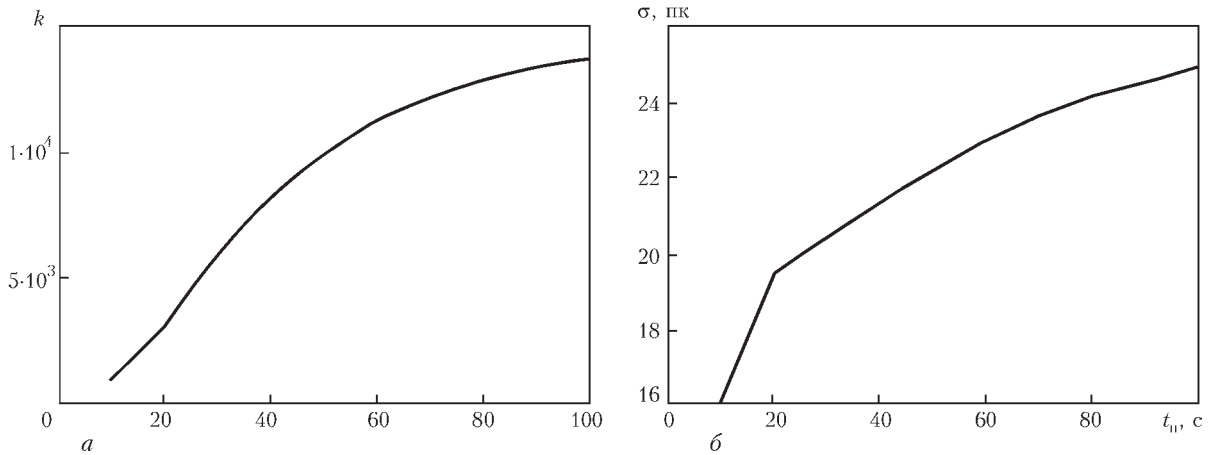


Рис. 11. Графіки функцій залежності масштабного коефіцієнта $k = f(t_n)$ (а) та дисперсії $\sigma = f(t_n)$ (б) при динамічному нагріванні нержавіючої сталі марки 08X18N10

три матеріалу, нагрів якого здійснюється за допомогою ГН по функціям залежності масштабного коефіцієнта k і дисперсії σ від часу нагрівання t_n .

Висновки

Встановлено, що за характером функції інтенсивності червоного каналу $f(R)$ зображення теплового випромінювання МП можливо ідентифікувати внутрішні та зовнішні дефекти металу. Отримані при обробці зображень теплових випромінювань джерел нагріву експериментальні дані підтверджують розроблені за допомогою алгоритму програмного середовища MathCAD математичні моделі цих випромінювань, а також дають змогу припустити, що цей алгоритм моделювання можливо застосовувати при визначенні теплофізичних параметрів матеріалу, що піддається нагріванню. Подальші дослідження слід спрямувати на встановлення залежності параметрів функції щільності ймовірності нормального закону розподілення від теплофізичних властивостей мате-

ріалу при динамічному режимі нагрівання (охолодження).

1. Пилипенко Н. В. Методы и приборы нестационарной теплотерии на основе решения обратных задач теплопроводности. – С.-Пб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 180 с.
2. 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 Міжн. наук.-практ. конф., Ч. II (15–17 травня 2012 р., Харків). – Харків, НТУ «ХПІ». – С. 105.
3. Неразрушающий контроль: Справ.: 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.
4. Пресс Ф. П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.
5. Canon EOS 20D. Инструкция по эксплуатации. – CANON INC. 2004. – 168 с.
6. Mirco multi purpose butane gas torch WS-503C. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.hisupplier.com/product-826813-Mirco-multi-purpose-butane-gas-torch-WS-503C>.
7. Гурский Д. А., Турбина Е. С. Вычисления в MathCAD12. – С.-Пб.: Питер, 2006. – 544 с.
8. Гайдьшев И. Анализ и обработка данных. – С.-Пб.: Питер, 2001. – 750 с.

The paper deals with the method of thermal non-destructive testing of metals, which can be applied in power engineering, mechanical engineering, ferrous and non-ferrous metallurgy at identification of surface and internal defects of metallurgical products, in particular items made by continuous casting and rolling. Analysis of thermal fields of metal plates, incorporating defects of various kinds and thermal fields of heat sources, was made. Investigations were performed with application of digital camera Canon EOS 20D with further processing of digital photos using Photoshop and MathCAD software environments and spatial visualization of derived results. Steel plates (08Kh18N10 steel grade) and TORCH WS-503C gas heater were selected for investigations. Investigations allowed derivation of mathematical models of heat radiation generated by TORCH WS-503C gas heater and 3d view of intensity function of red channel $f(R)$ of the image of thermal radiation of a steel plate with defects, the shape of which allows them to be identified. 8 References, 2 Tables, 11 Figures.

Keywords: thermal nondestructive testing, digital camera, gas heater, temperature lamp, absolutely black body, defect, metal plate, thermal radiation

Надійшла до редакції
20.01.2015