

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

СЛАВКОВ ВІКТОР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 620.179

**РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО ФОТОГРАФІЧНОГО МЕТОДУ ТЕПЛОВОГО
КОНТРОЛЮ МЕТАЛІВ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Давиденко Олександр Петрович,
пенсіонер

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Стороженко Володимир Олександрович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки, м. Харків,
професор кафедри фізики

кандидат технічних наук
Михалевський Дмитро Валерійович,
Вінницький національний технічний
університет, м. Вінниця,
старший викладач кафедри телекомунікаційних
систем і телебачення

Захист відбудеться "08" жовтня 2015 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розіслано "07" вересня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Глоба С.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час методи теплового неруйнівного контролю (ТК) представляють високотехнологічну область прикладних досліджень, яка об'єднує досягнення в теорії теплопередачі, цифрової вимірювальної техніки та комп'ютерної обробки експериментальних даних. В останні роки зростаючий інтерес до ТК обумовлений появою на ринку тепловізійної техніки нового покоління, яка поєднує у собі функціональні можливості як безпосередньо тепловізора так і цифрового фотоапарата (ЦФ), та унікальними можливостями комп'ютерної обробки цифрових зображень, що в сукупності, дозволяє реалізувати на практиці потенційні переваги теплового контролю.

Істотний внесок у створення основ теплового методу внесли В. П. Вавілов, В. В. Ключев, К. Малдаг, В. О. Стороженко та інші. На даний час застосування тепловізорів при ТК, за рідкісним винятком, обмежується низькотемпературними вимірюваннями (до 600 °С), вони мають невисоку просторову роздільну здатність у зв'язку з малими розмірами приймаючої матриці, а вимірювання за допомогою пірометрів дають інтегральну оцінку температури об'єкта контролю в межах плями візування. Значна вартість зарубіжної тепловізійної і пірометричної техніки, відсутність сучасного власного виробництва цифрових тепловізорів вимагають розробки нових методів ТК, заснованих на використанні економічно не обтяжливих пристроїв фіксації теплового поля об'єктів контролю. Таким є цифровий фотоапарат, який працює у видимому діапазоні спектру, і відповідно, дозволяє встановити присутні дефекти при температурах від 600 °С.

Отже, науково-практична задача із розробки методу ТК металів з використанням цифрового фотоапарата для аналізу температурних полів на поверхні металів та встановлення значень температурних перепадів є актуальною для сучасної техніки та визначила напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХПІ» в рамках задач комплексної держбюджетної теми МОН України «Підвищення точності вимірювальних перетворювачів засобами вбудованого тестового контролю» (ДР № 0109U002421), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* полягає у обґрунтуванні і розробці методу ТК металів із використанням цифрового фотоапарата у якості детектора теплового випромінювання у видимому діапазоні спектру та побудові алгоритмів обробки цифрових зображень температурних полів об'єктів контролю, які знаходяться при температурах понад 600 °С.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні *задачі*:

- проаналізувати сучасний стан теплового контролю та підтвердити перспективність застосування ЦФ;
- виявити можливість використання матриці ЦФ у якості детектора теплового випромінювання металів при високих температурах та встановити оптимальне значення довжини хвилі інтерференційного світлофільтру;
- розробити процедуру калібрування ЦФ за допомогою еталона абсолютно чорного тіла (АЧТ) та встановити залежність яскравісної температури АЧТ від інформативного параметру червоного компоненту цифрового зображення;
- оцінити вплив основних факторів, які являють собою завади, при

проведенні процедури калібрування ЦФ;

– встановити основні аналітичні залежності для цифрового фотографічного методу ТК металів і розробити на їх основі програмні алгоритми, які дозволять визначити розподіл значень істинних температур на поверхні металу та розрахувати значення абсолютного та відносного температурних контрастів викликаних впливом дефектів;

– обґрунтувати основні положення та розробити програмні алгоритми, які дозволять вирішити додаткові задачі ТК металів, а саме: а) визначення значення питомої масової теплоємності металів; б) розміщення нагрівачів та побудові моделей температурних полів на поверхні металів; в) встановлення розподілу значень коефіцієнту випромінювальної здатності поверхні металів;

– розробити програмні алгоритми автоматичного керування процесом інтервальної зйомки за допомогою ЦФ та його налаштуваннями і отримати, експериментальним шляхом, серії температурних зображень (термофільми) поверхні металів, для подальшої їх обробки;

– розробити індукційний нагрівач та провести дослідно-промислові випробування розробленого цифрового фотографічного методу ТК металів при температурах об'єктів контролю понад 600 °С.

Об'єкт дослідження – процеси формування, реєстрації та обробки поверхневих температурних полів металевих об'єктів різних за складом та геометричними розмірами в результаті їх високотемпературного нагріву.

Предмет дослідження – фотографічні методи ТК металевих об'єктів, які засновані на використанні цифрового фотоапарата.

Методи дослідження базуються на використанні: теоретичних основ методу індукційного нагріву металів та основ електротехніки при побудові індукційного нагрівача; основних положень метрології оптичного випромінювання (фотометрія, колориметрія) при визначенні кольорових можливостей ЦФ та встановленні його спектральної чутливості; теоретичних основ теплообміну, при проведенні процедури калібрування цифрового фотоапарата та встановленні функції взаємозв'язку яскравісної температури та компоненту червоного цифрових зображень; методів цифрової обробки сигналів та комп'ютерного програмування у середовищі LabView при обробці сигналів термоелектричних перетворювачів і керуванні налаштуваннями ЦФ; теоретичних основ оптичної (яскравісної) пірометрії для встановлення розподілень істинних температур та коефіцієнту випромінювальної здатності поверхні металу; комп'ютерного програмування у середовищі MathCAD при розробці алгоритмів обробки зображень поверхні металів, для встановлення значень температурних контрастів та теоретичних основ калориметрії для визначення теплоємності металу; основ функціонального аналізу для побудови моделей рівномірних температурних полів на поверхні металів.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше застосовано цифровий фотоапарат у якості засобу фіксації температурного поля при ТК металів. В результаті обробки отриманих цифрових зображень встановлені температурні перепади на поверхні металів, за рахунок наявності в них дефектів. На базі цифрового фотоапарата розроблено перспективний метод ТК металів, що загалом дозволяє здешевити процедуру

діагностики технічного стану об'єктів металургійної та машинобудівної галузей.

2. Вперше розроблена математична модель теплових процесів, що дозволяє вирішити задачу розміщення певної кількості однакових за параметрами нагрівачів для отримання температурного поля заданої конфігурації на поверхні металеві пластини, за рахунок використання цифрового фотоапарата при аналізі просторово енергетичних параметрів одного нагрівача.

3. Удосконалено метод калібрування цифрового фотоапарата у видимому діапазоні спектру теплового випромінювання із використанням у якості робочого еталона випромінювача типу абсолютно чорного тіла, що дозволило підвищити точність передавання їм одиниці термодинамічної температури за рахунок автоматизації процесу проведення процедури калібрування та цифрової обробки даних.

4. Отримали подальший розвиток методи визначення теплоємності металів та визначення коефіцієнту випромінювальної здатності їх поверхні за рахунок використання цифрового фотоапарата у якості перетворювача істинної температури та детектора просторового розподілення яскравісної температури поверхні металу, що дозволило підвищити оперативність даних методів та знизити вартість процедури їх проведення.

Практичне значення отриманих результатів для металургійної та машинобудівної галузей полягає в тому, що запропоновано новий метод ТК металів при високих температурах, заснований на використанні цифрового фотоапарата, який за своїми метрологічними характеристиками не поступається існуючим методам теплового виду неруйнівного контролю (патент України на корисну модель № 90803). Для реалізації запропонованого методу на базі сучасних цифрових фотоапаратів і обчислювальних засобів створено системи контролю (вимірювання) та розроблено програмні алгоритми обробки даних і керування налаштуваннями цифрового фотоапарата для забезпечення теплового виду неруйнівного контролю металів в лабораторних і промислових умовах.

Цифровий фотографічний метод теплового контролю металів при високих температурах впроваджено у ТОВ «Виробниче об'єднання Сплав-500» (м. Харків) для теплового контролю виробів металопрокату, ТОВ «ГТ» (м. Харків) при проведенні процедури ТК комплектуючих електробритви в процесі їх загартування. Результати отримані в дисертаційній роботі, використані у кувально-пресовому та термічному виробництві ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ) та навчальному процесі кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології і системи» НТУ «ХП» при підготовці лабораторного практикуму та методичного забезпечення для студентів напряму 6.051001 «Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології».

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, які виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: обґрунтування планів і програм експериментів з аналізу характеристик зразкових світловимірювальних ламп розжарювання, встановлення спектральної чутливості системи «цифровий фотоапарат + об'єктив», виконання досліджень із калібрування систем та визначення факторів які впливають на процес калібрування, проведення процедур ТК металів різних за геометричними розмірами та складом за допомогою запропонованого в роботі цифрового фотографічного методу, проведення експериментальних досліджень направлених на вирішення додаткових завдань ТК,

а саме визначення теплоємності металів, моделювання температурного поля на їх поверхні та визначення коефіцієнту випромінювальної здатності поверхні металів, обробка та узагальнення результатів, участь у випробуваннях і впровадженнях.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідалися на: XVII – XXII Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, НТУ «ХПІ», 2009 – 2014рр.); II Міжнародній науково-технічній конференції «Приборостроение – 2009» (м. Мінськ, БНТУ, 2009р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія – 2010)» (м. Харків, ННЦ «Інститут метрології», 2010р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення» (м. Севастополь, СевНТУ, 2011р.); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів» (м. Кременчук, КНУ ім. М. Остроградського, 2012р.); I Всеукраїнській науково-технічній конференції «Современные тенденции развития приборостроения» (м. Луганськ, СНУ ім. Даля, 2012р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Системи – 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань» (м. Львів, НУ «Львівська політехніка», 2013р.); Науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Актуальные проблемы автоматизации и приборостроения Украины» (м. Харків, НТУ «ХПІ», 2013р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено в 25 наукових публікаціях, з них: 9 статей у наукових фахових виданнях України, 1 – у іноземному періодичному фаховому виданні, 2 патенти України на корисні моделі, 13 – у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 243 сторінки, з них: 68 рисунків по тексту; 6 рисунків на 6 сторінках; 17 таблиць по тексту; 19 таблиць на 23 сторінках; список використаних джерел з 189 найменувань на 20 сторінках; 6 додатків на 50 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** висвітлено актуальність, обґрунтовано мету та основні завдання дослідження. Показано зв'язок роботи із науковими програмами та планами. Сформульовано наукову новизну отриманих результатів і показано їх практичну цінність, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та основні праці, опубліковані за темою дисертації.

Перший розділ присвячено комплексному аналізу науково-технічної інформації щодо сучасного стану ТК, дистанційного вимірювання температури та визначення теплофізичних властивостей металів. Відзначено, що методи ТК знайшли застосування у провідних країнах світу при контролі й діагностиці в різних галузях: авіа- і машинобудуванні, енергетиці, будівництві, приладобудуванні, медицині й т.д. Наведено результати аналізу технічних характеристик та вартості засобів теплового й термографічного контролю закордонного та вітчизняного виробництва: тепловізорів, пірометрів. Вартість сучасних приладів ТК становить від 35000 грн. до 300000 грн. На даний момент на ринку тепловізійної техніки з'явилися тепловізори, які поєднують у собі функції

тепловізору та цифрового фотоапарата. Показано, що значна вартість зарубіжної високотемпературної тепловізійної техніки вимагає розробки нових більш простих і дешевих методів ТК металів, що дозволять встановити дефекти в об'єктах, нагрітих до температур понад 600 °С. Обґрунтовано доцільність використання цифрового фотоапарата для ТК металів, що працює у видимому діапазоні спектру і має значно меншу ціну (приблизно 10000 грн.), та відповідно сформульовані задачі, що вимагають вирішення для досягнення поставленої мети.

У **другому розділі** описано об'єкти досліджень, моделі цифрових фотоапаратів (об'єктивів), додаткове обладнання і методики проведення експериментів із зазначенням використаних приладів. Наведені характеристики вузькосмугового інтерференційного світлофільтру (ІСФ) використовуваного у дослідженнях, схема електрична принципова та блок схема спеціально розроблених для проведення експериментів перетворювача сигналів термопар та індукційного нагрівача відповідно. При проведенні досліджень із ТК металів у якості досліджуваних об'єктів використано зразки сталі марок 08X18H10 та СтЗпс наступних геометричних розмірів (рис. 1 а, б) зі штучно внесеними дефектами різних геометричних розмірів (рис. 1 в, г). У експериментах використовувались моделі ЦФ наступних фірм виробників: 1) SAMSUNG PL60; 2) SONY DSC H5; 3) NIKON D90; 4) CANON 20D, та наступні моделі змінних об'єктивів: 1) HELIOS-44М-4; 2) JUPITER-9. Згідно із розробленим алгоритмом проведено розрахунок поля зору та роздільної здатності для наступних комбінацій систем (ЦФ + змінний об'єктив): 1) ЦФ CANON 20D + HELIOS-44М-4; 2) ЦФ NIKON D90 + JUPITER-9.

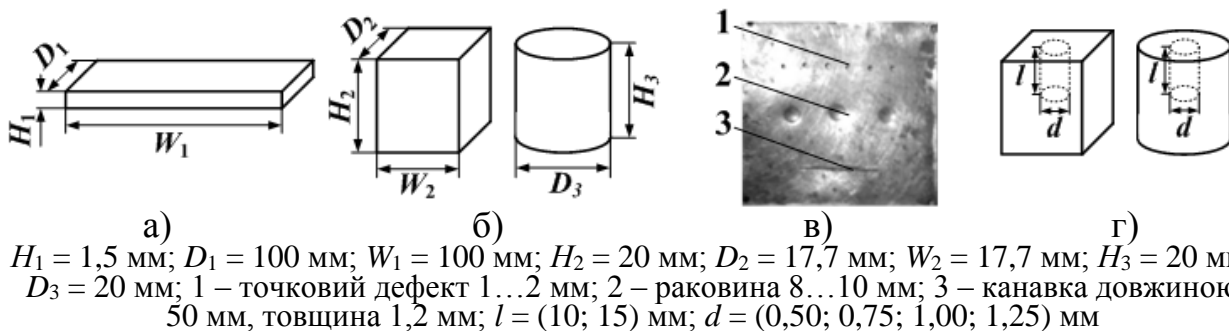


Рисунок 1 – Зразки металу, що використовувались в ході експериментів

Результати розрахунку поля зору та роздільної здатності даних комбінацій систем, що в подальшому використовуються при проведенні процедури ТК металів, у графічному вигляді наведені на (рис. 2, а) та (рис. 2, б). Дані результати характеризують найменшу роздільну здатність методу, яка становить $5,18 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$ у випадку використання ЦФ NIKON D90 із матрицею 4288×2848 пікселей та об'єктиву JUPITER-9. У більшості випадків сучасні тепловізори у своєму складі містять матриці до 640×480 пікселей і відповідно мають значно гіршу роздільну здатність. Також при проведенні досліджень використовувались термоелектричні перетворювачі (термопари) відкритого виконання К типу. Для подальшої цифрової обробки сигналів термопар розроблено перетворювач сигналів термопар (ПСТ) на основі мікросхеми AD597 фірми виробника Analog Devices. Для проведення високотемпературного нагріву розроблено індукційний нагрівач (ІН).

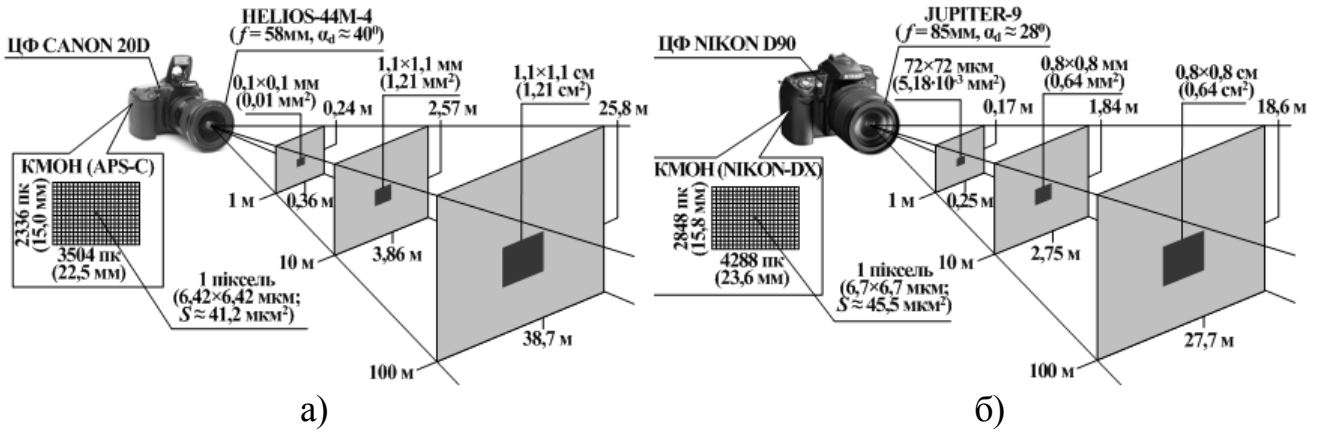


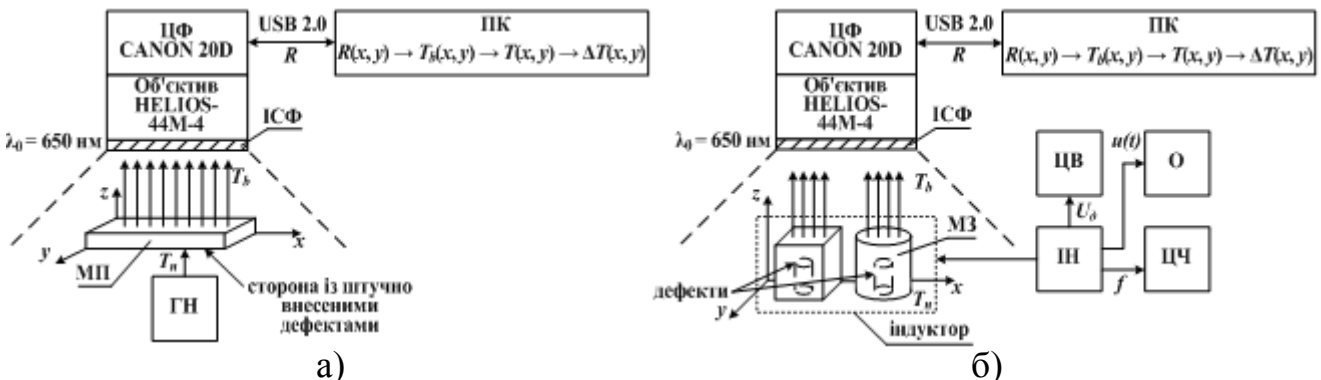
Рисунок 2 – Розрахунок поля зору ЦФ зі змінним об'єктивом

Калібрування ЦФ проводилось за допомогою методу прямого вимірювання яскравісної температури T_b зразкової температурної лампи (ТЛ) ТРУ 1100-2350 на установці УПО-6М2 (рис. 3). Для встановлення об'єктивів на ЦФ CANON 20D та NIKON D90 використовувались перехідники м42-canon EF, EF-S та м42-nikon F відповідно. На об'єктиви за допомогою перехідних кілець попередньо встановлено інтерференційний світлофільтр (ІСФ).



Рисунок 3 – Послідовність проведення операцій із калібрування системи «ЦФ + об'єктив»

ТК досліджуваних зразків металів запропонованим в роботі методом здійснювався за наступними блок схемами (рис. 4).



ЦФ – цифровий фотоапарат; ЦВ – цифровий вольтметр змінного струму; ЦЧ – цифровий частотомір; О – осцилограф; ПК – персональний комп'ютер; ГН – газовий нагрівач; ІН – індукційний нагрівач; ІСФ – інтерференційний світлофільтр; МП – металева пластина; МЗ – металевий зразок

Рисунок 4 – Блок схеми проведення експериментів із металевими пластинами марки 08X18H10 (а) та металевими зразками марки Ст3пс (б)

У **третьому розділі** наведені основні положення запропонованого в роботі методу та розроблені програмні алгоритми обробки цифрових зображень температурного поля поверхні металів.

Вимірювання температури тіл по інтенсивності теплового випромінювання (оптична пірометрія) широко використовується в наукових дослідженнях і промисловості. Оптична пірометрія базується на використанні законів випромінювання АЧТ. Головна умова застосовності оптичної пірометрії – випромінювання нагрітого тіла має підкорятися закону Кірхгофа. Як правило тверді тіла і рідини при високій температурі задовольняють цій вимозі. Яскравісна пірометрія заснована на вимірюванні яскравості досліджуваного об'єкта на одній довжині хвилі λ_0 . Відповідно до закону Кірхгофа, яскравісною температурою тіла T_b на довжині хвилі λ_0 називається така температура T АЧТ, при якій яскравості АЧТ і досліджуваного тіла однакові на довжині хвилі λ_0 , тобто

$$\varepsilon(\lambda_0, T) \cdot b(\lambda_0, T) = b(\lambda_0, T_b), \quad (1)$$

де λ_0 – довжина хвилі, м; T, T_b – відповідно істинна та яскравісна температура, К; $b(\lambda_0, T)$ – поверхнева спектральна яскравість тіла, Вт/м²/м; $\varepsilon(\lambda_0, T)$ – коефіцієнт випромінювання поверхні (або коефіцієнт сірості); $b(\lambda_0, T_b)$ – поверхнева спектральна яскравість АЧТ, Вт/м²/м.

Очевидно, що яскравісна температура збігається з істинною при $\varepsilon = 1$. В практично важливому випадку: $\exp(c_2/\lambda T) \ll 1$ для зв'язку яскравісної і істинної температур маємо наступний наближений вираз

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_b} + \frac{\lambda_0}{c_2} \ln \varepsilon(\lambda_0, T), \quad (2)$$

де $c_2 = hc/k = 0,01439$ м·К – друга постійна випромінювання; $\lambda_0 = 650$ нм – довжина хвилі ІСФ.

Вираз (2) виконується із похибкою $\sim 0,1$ % для $\lambda T < 3000$ мкм·К.

Оскільки активний піксель ЦФ є одиничним елементом твердотільної решітки, що має фотоелектричну передаточну функцію при дії світлового електромагнітного випромінювання, світловий потік, котрий виникає за рахунок теплового випромінювання від ОК, і який характеризується своєю енергетичною яскравістю можливо зафіксувати за допомогою матриці ЦФ, тобто встановити яскравісну температуру T_b ОК. Згідно з формулою (1) вимірювання яскравісної температури проводиться на певній довжині хвилі λ_0 , для виділення якої, використовується вузького-смуговий інтерференційний світлофільтр. Тому, при виборі λ_0 необхідно враховувати спектральну характеристику системи «ЦФ + об'єктив». Згідно із формулою Планка, яка описує спектральну щільність потужності випромінювання АЧТ, вже при температурах понад 600 °С, частина енергії що виділяється АЧТ, припадає на кінець видимої, а саме червоної ($\lambda = 625 \dots 740$ нм) області спектру, що наглядно підтверджується при високотемпературному нагріві металів.

Випромінювання реальних тіл (металів) порівняно мало відрізняється від випромінювання АЧТ при тій же температурі. Дана відмінність характеризується

коефіцієнтом випромінювальної здатності ε металів. На рис. 5 наведені результати проведеного розрахунку значень нормованої спектральної щільності потужності випромінювання $u(\lambda, T)_{1,2,3}$ АЧТ при температурах 650 °С (1), 800 °С (2) та 1000 °С (3), нормованої спектральної щільності потужності випромінювання $u(\lambda, T)_{4,5,6}$ сірого тіла з коефіцієнтом $\varepsilon = 0,65$ при тих же самих температурах (4 – 650 °С, 5 – 800 °С, 6 – 1000 °С) та відносна спектральна чутливість $S_R(\lambda)$ червоного компоненту R матриці ЦФ NIKON D90 (7), яка надається фірмою виробником.

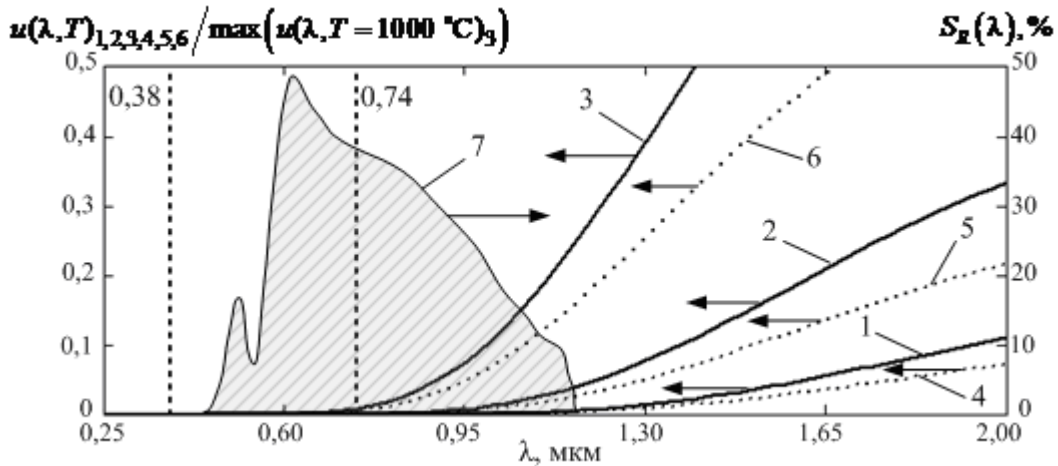


Рисунок 5 – Нормована спектральна щільність потужності випромінювання АЧТ (1, 2, 3), сірого тіла (4, 5, 6) та відносна спектральна чутливість червоного компоненту R матриці ЦФ NIKON D90 (7)

Результати розрахунку свідчать про можливість використання матриці ЦФ при температурах від 650 °С у якості детектора теплового випромінювання ОК за рахунок перекриття функцією 7 функцій 6, 5, 4.

За допомогою розробленого програмного алгоритму проведено процедуру калібрування систем «ЦФ + об'єктив» комбінації яких наведені у табл. 1 у випадку наступних діапазонів значень яскравісної температури T_b ТЛ ТРУ 1100-2350 (див. табл.1) та факторів, що впливають.

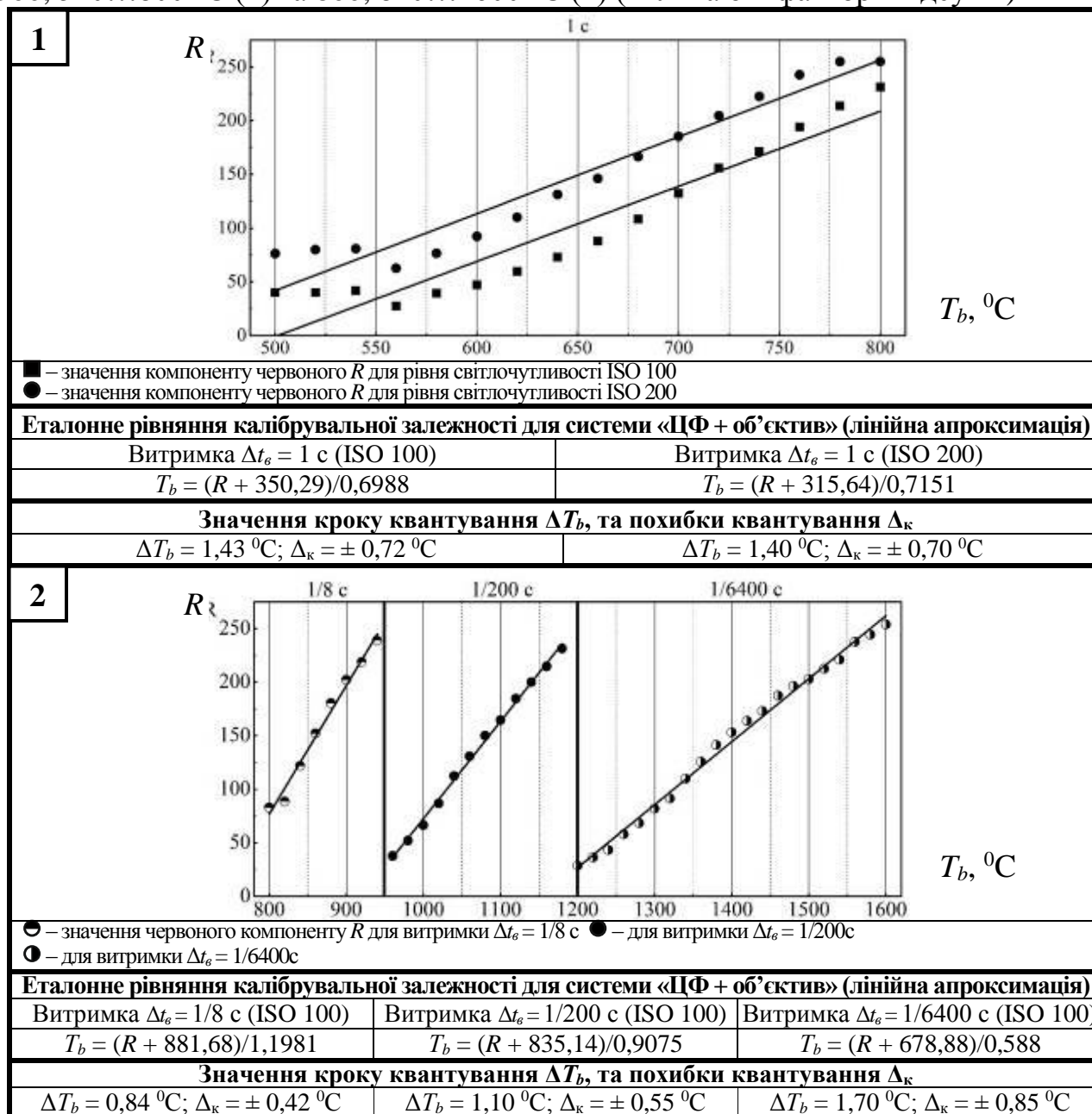
Таблиця 1 – Діапазони яскравісних температур T_b ТЛ ТРУ 1100-2350 при калібруванні наступних комбінацій систем «цифровий фотоапарат + об'єктив»

№ п/п	Діапазон яскравісних температур T_b ТЛ ТРУ 1100-2350	Значення світлочутливості ISO, діафрагми D та витримки фотографування Δt_e , які встановлювались на ЦФ та (об'єктиві)	Комбінація систем «ЦФ + об'єктив»
1	500, 520...800 °С	ISO = (100; 200; 400; 800; 1600) $D = f/2.0$ $\Delta t_e = (6; 5; 4; 2; 1; 0,5) \text{ с}$	ЦФ CANON 20D + HELIOS-44M-4
2	800, 820...1600 °С (+ впливаючі фактори)	ISO = (100; 200) $D = (f/2.0; f/5.6)$ $\Delta t_e = (1/6; 1/200; 1/6400) \text{ с}$	ЦФ CANON 20D + HELIOS-44M-4
3	800, 900...1800 °С	ISO = (100; 200; 400; 800; 1600) $D = (f/2; f/2.8; f/4; f/5.6; f/8; f/11; f/16)$ $\Delta t_e = (4; 2; 1; 0,5; 1/4; 1/8; 1/15; 1/30; 1/60; 1/125; 1/250; 1/500; 1/1000; 1/2000; 1/4000; 1/8000) \text{ с}$	ЦФ CANON 20D + HELIOS-44M-4; ЦФ CANON 20D + JUPITER-9

f – фокусна відстань використовуваного об'єктиву, мм

Дані фактори умовно поділені на внутрішні та зовнішні. До внутрішніх факторів віднесені основні параметри налаштувань ЦФ, а до зовнішніх – параметри зовнішнього середовища, що знаходиться між температурною лампою (або об'єктом контролю) та ЦФ. В результаті використання розробленого алгоритму можливо встановити функціональну залежність яскравісної температури T_b АЧТ від рівня червоного компоненту матриці ЦФ R $T_b = f(R)$ для системи «ЦФ + об'єктив» у вигляді аналітичних залежностей (табл. 2).

Таблиця 2 – Калібрувальні залежності $T_b = f(R)$ для системи «ЦФ CANON 20D + HELIOS-44M-4» у діапазонах яскравісних температур T_b ТЛ ТРУ 1110-2350 500, 520...800 °C (1) та 800, 820...1600 °C (2) (впливаючі фактори відсутні)



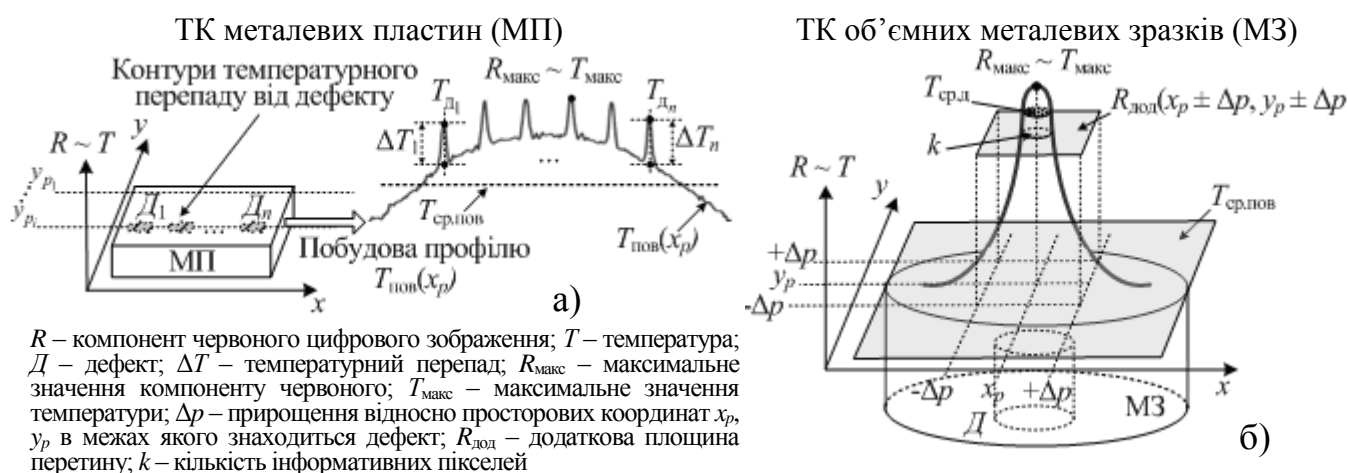
При безпосередньому ТК металів дані залежності використовуються для знаходження просторового розподілення яскравісної температури ОК, для чого оброблюється кожний піксель цифрового зображення ОК згідно із розробленим алгоритмом. Після встановлення функціональної залежності $T_b = f(R)$ можливо

здійснити перехід до істинної термодинамічної температури T ОК за допомогою рівняння (2), для функції $T = f(T_b)$, що використовується у розробленому програмному алгоритмі для обробки цифрових зображень теплового поля. Для проведення процедури ТК наведених на рис. 1 об'єктів розроблені програмні алгоритми, що дозволяють встановити значення абсолютного ΔT та відносного A температурних контрастів (рис. 6), розрахунок яких здійснюється за наступними формулами:

$$\Delta T_n = T_{дн}(x_p) - T_{пов}(x_p), \quad (3) \quad \Delta T = T_{ср.д} - T_{ср.пов}, \quad (5)$$

$$A_n = \Delta T_n / T_{пов}(x_p), \quad (4) \quad A = \Delta T / T_{ср.пов}, \quad (6)$$

де x_p, y_p – просторові координати вказані у пікселях, пк; $T_{д}, T_{ср.д}$ – температура поверхні та відповідно середня температура поверхні над дефектом, $^{\circ}\text{C}$; $T_{пов}, T_{ср.пов}$ – температура поверхні у бездефектній області та відповідно середня температура поверхні контрольованого зразку металу.



R – компонент червоного цифрового зображення; T – температура; D – дефект; ΔT – температурний перепад; $R_{макс}$ – максимальне значення компоненту червоного; $T_{макс}$ – максимальне значення температури; Δr – приращення відносно просторових координат x_p, y_p в межах якого знаходиться дефект; $R_{дод}$ – додаткова площина перетину; k – кількість інформативних пікселей

Рисунок 6 – Схематичні зображення з аналізу зрізів червоного компоненту R при проведенні експериментів з МП (а) та просторового розподілення рівнів червоного компоненту R при проведенні експериментів з МЗ (б)

Окрім цього, у даному розділі обґрунтовані основні положення та розроблені програмні алгоритми, які дозволяють вирішити додаткові задачі ТК металів, а саме: а) визначення питомої масової теплоємності металів; б) розміщення певної кількості нагрівачів для отримання рівномірних температурних полів на поверхні металів; в) встановлення розподілу коефіцієнту випромінювальної здатності поверхні металів.

В основу способу визначення теплоємності зразку заліза покладено спосіб визначення питомої теплоємності металів при їх охолодженні. Вимірювання швидкостей охолодження двох зразків з відомою і невідомою теплоємністю відбувається дистанційно за допомогою ЦФ (патент України на корисну модель № 90802).

Згідно із розробленим алгоритмом проводився розрахунок невідомої теплоємності заліза c_{Fe} по наступній залежності

$$c_{Fe_i} = c_{CuTab_i} \cdot m_{Cu} \left(\frac{\Delta T_{Cu}}{\Delta t_u} \right)_i / m_{Fe} \left(\frac{\Delta T_{Fe}}{\Delta t_u} \right)_i, \quad (7)$$

де c_{CuTab} – відомі значення питомої масової теплоємності міді при певній температурі, Дж/кг·К; Δt_u – інтервал циклу фотографування; $\Delta T_{Cu}, \Delta T_{Fe}$ – змінення температур поверхонь зразків міді та заліза відповідно через інтервал часу $\Delta t_u, ^{\circ}\text{C}$; i – номер кадру.

Подальші дослідження направлені на розробку програмного алгоритму який дозволив моделювати рівномірні розподілення рівня червоного компоненту R по поверхні МП у одномірному $R'(x_p, m_1)$ і двомірному вигляді $R'(x_p, y_p, m)$, а відповідно і рівномірні температурні поля $T'(x_p, m_1)$, $T'(x_p, y_p, m)$, у певний момент нагрівання МП від m_1 та m кількості однакових за параметрами ГН. Даний алгоритм передбачає можливість розрахунку їх кількості m_1 , у випадку одномірного представлення, та $m = m_1 \cdot m_2$, у випадку двомірного представлення, де m_1 та m_2 – кількість строк та стовбців матриці ГН, та відстані віддалення l ГН один від одного, виходячи із заданих геометричних розмірів ширини W та глибини D МП. Моделювання одномірного $R'(x_p, m_1)$ та двомірного $R'(x_p, y_p, m)$ рівномірних розподілень у алгоритмі відбувається за допомогою наступних виразів:

$$T'(x_p, m_1) \approx R'(x_p, m_1) = \left(\sum_{i=0}^{m_1-1} K \cdot \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(x_p - [\mu_{x_p}]_i)^2}{2\sigma^2} \right) \right) \right), \quad (8)$$

$$T'(x_p, y_p, m) \approx R'(x_p, y_p, m) = \left(\sum_{j=0}^{m-1} K \cdot \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(x_p - [\mu_{x_p}]_j)^2}{2\sigma^2} \right) \times \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(y_p - [\mu_{y_p}]_j)^2}{2\sigma^2} \right) \right) \right) \right), \quad (9)$$

де $[\mu_{x_p}]_i$, $[\mu_{x_p}]_j$, $[\mu_{y_p}]_j$ – масиви математичних очікувань, які характеризують місце позиціонування кожного ГН в одномірній та двомірній матриці таких нагрівачів, пк; σ – дисперсія розподілення, пк; K , k_1 , k_2 – масштабні коефіцієнти; $i = 0..m_1$, $j = 0..m$ – індекси елементів масивів математичних очікувань.

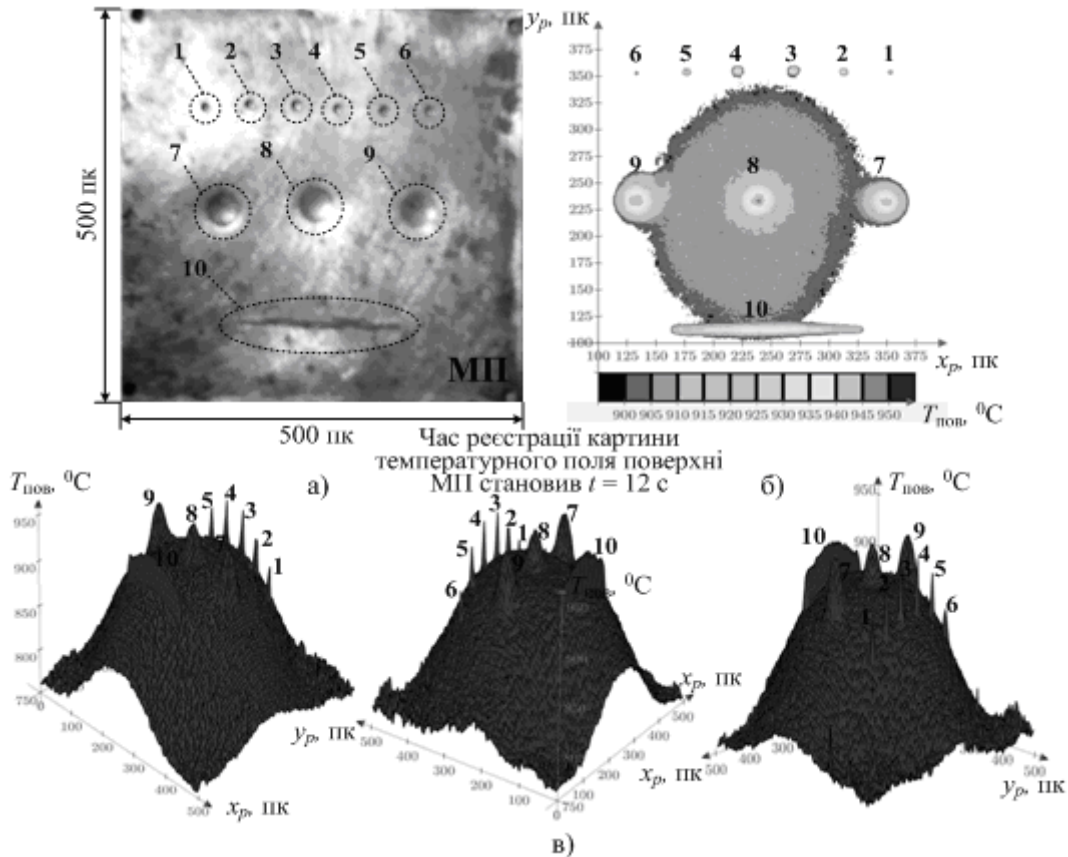
Запропоновано метод визначення просторового розподілення коефіцієнту випромінювальної здатності ε поверхні листової сталі за допомогою ЦФ, що в свою чергу, також дозволило правильно враховувати розподілення даного коефіцієнту при переході до розподілення істинної температури по поверхні металів. Розподілення коефіцієнту ε визначається за допомогою наступного виразу

$$\varepsilon_{x_p, y_p}(\lambda_0, T_b(x_p, y_p), T(x_p, y_p)) = \exp \left(\frac{c_2 (T_b(x_p, y_p) - T(x_p, y_p))}{\lambda_0 \cdot T_b(x_p, y_p) \cdot T(x_p, y_p)} \right), \quad (10)$$

де $T(x_p, y_p)$ – розподілення істинної термодинамічної температури по поверхні МП нержавіючої сталі, встановлюється за допомогою рівномірно розподілених термопар контактним способом, К; $T_b(x_p, y_p)$ – розподілення яскравісної температури по поверхні МП, встановлюється за допомогою ЦФ, К; $c_2 = 0,01439$ м·К – друга радіаційна постійна; λ_0 – довжина хвилі ІСФ, м.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням теплових полів металів за допомогою розробленого цифрового фотографічного методу ТК, а саме отриманню серій температурних зображень (термофільмів) поверхні металів різних за формою та складом, в результаті їх нагрівання (охолодження), для подальшої їх обробки розробленими алгоритмами та визначенню значень температурних контрастів в результаті впливу присутніх в них дефектів. В результаті проведення процедури ТК МП встановлені двомірні та тривимірні картини температурного поля $T_{пов}(x_p, y_p)$ на поверхні МП, за характером яких можливо виявити присутні в ній дефекти (рис. 7). Фіксація температурного поля

відбувалась зі зворотної сторони МП, із попереднього аналізу контурного графіку (двомірної картини) (рис. 7, б) та тривимірної картини (рис. 7, в) видно, що температурні перепади збігаються із місцем розташування штучно внесених дефектів. Купольна форма температурного поля пояснюється тим, що нагрів МП здійснювався за допомогою одного точкового газового нагрівача, тобто в цілому за рахунок крайових ефектів пластина прогрівалась нерівномірно по всій площині. Для кожного дефекту із номерами 1...10 за допомогою попередньо розробленого алгоритму розраховані значення абсолютного ΔT та відносного A температурних контрастів: 1 – 52,0 °C (6,01 %); 2 – 46,0 °C (5,19 %); 3 – 48,0 °C (5,37 %); 4 – 44,0 °C (4,94 %); 5 – 51,0 °C (5,77 %); 6 – 47,0 °C (5,45 %); 7 – 38,0 °C (4,20 %); 8 – 36,0 °C (3,96 %); 9 – 34,0 °C (3,74 %); 10 – 50,0 °C (5,63 %).



а – зображення поверхні досліджуваної МП; б – контурний графік (двомірна картина) температурного поля МП $T_{пов}(x_p, y_p)$; в – тривимірна картина поля $T_{пов}(x_p, y_p)$
Рисунок 7 – Результати обробки цифрових зображень поверхні МП

При проведенні експериментів із МЗ по отриманих значеннях розподілу істинних температур їх контрольованої поверхні $T_{пов}(x_p, y_p)$ побудовані 2D (контурний) та 3D (тривимірний) графіки (див. табл. 3) для кожного моменту циклу фотографування $\Delta t_{ф}$, вигляд яких дозволив ідентифікувати внутрішні дефекти МЗ. Явище перегріву поверхні зразку над дефектом представлено у вигляді піків на 3D графіках та більш яскравіших контурах на 2D графіках. У даному випадку також розраховані значення абсолютного та відносного температурних контрастів (табл. 3). За отриманими даними ТК МЗ запропонованим методом визначено, що усереднене значення температури поверхні над дефектом $T_{ср.д.}$ залежить від об'єму дефекту V_d . Також встановлено взаємозв'язок між кількістю інформативних пікселів k цифрового зображення поверхні МЗ, тобто між кількістю тих пікселів, що свідчать про аномальну температуру поверхні над дефектом та об'ємом дефекту V_d (рис. 8).

Таблиця 3 – Результати обробки цифрових зображень поверхні МЗ

№ п/п	Форма МЗ, діаметр d , мм і глибина l , мм штучного дефекту та його об'єм V_{δ} , мм ³ . Відношення об'єму дефекту до об'єму МЗ V_{δ}/V	Вигляд розподілу істинних температур контрольованої поверхні МЗ $T_{\text{пов}}(x_p, y_p)$, °С (2D режим, контурний графік)	Вигляд розподілу істинних температур контрольованої поверхні МЗ $T_{\text{пов}}(x_p, y_p)$, °С (3D режим, тривимірний графік, час реєстрації картини температурного поля поверхні МЗ становив $t = 5$ с після припинення процесу нагрівання)	
1	Прямокутний паралелепіпед: $d = 0,50$; $l = 10,00$; $V_{\delta} = 1,96$; $V_{\delta}/V = 1/3206$;			
2	Циліндр: $d = 0,50$; $l = 10,00$; $V = 1,96$; $V_{\delta}/V = 1/3206$;			
Кількість інформативних пікселів k , цифрового зображення поверхні МЗ		Значення температурних контрастів на поверхні МЗ		
		Абсолютне ΔT , °С		Відносне A , %
1	44	55,7		7,39
2	44	56,9		7,57

В результаті проведення експериментальних досліджень спрямованих на вирішення додаткових завдань ТК встановлені значення питомої масової теплоємності заліза c_{Fe} (рис. 9) у діапазоні температур 600...670 °С (максимальна відносна похибка вимірювання теплоємності запропонованим методом складає 2,54 %).

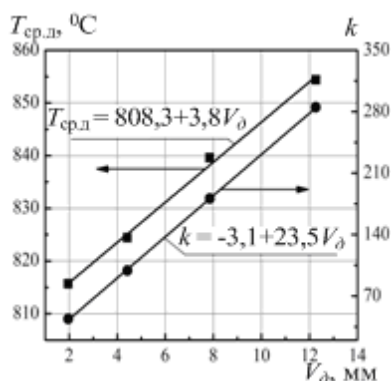


Рисунок 8 – Залежності кількості інформативних пікселів k та усередненого значення температури поверхні МЗ над дефектом $T_{\text{ср.д}}$ від об'єму штучно внесеного дефекту V_{δ}

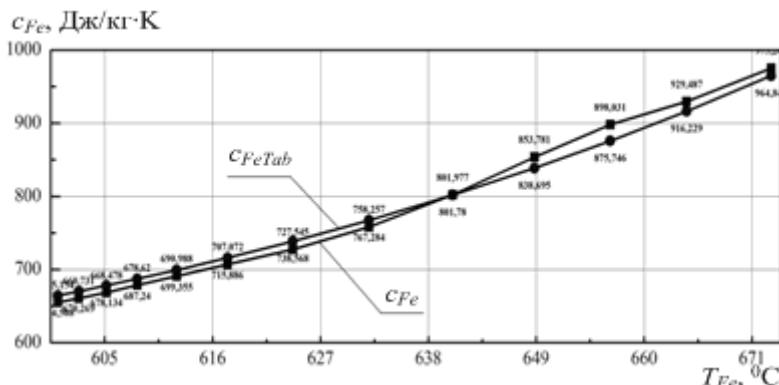


Рисунок 9 – Встановлені значення теплоємності заліза c_{Fe} та її табличні значення c_{FeTab} , рекомендовані в CODATA key values for thermodynamics. Editors: Cox J.D., Wagman D.D., Medvedev V.A., New-York, Washington: Hemisphere Publ. Corp., 1989, 271 p.

На рис. 10 представлений результат моделювання рівномірного температурного поля на поверхні МП за допомогою розробленого алгоритму від 1225 однакових ГН в момент часу нагрівання $t = 95$ с. Геометричні розміри МП у пікселях становили 1000×1000 пк.

Встановлено вигляд двомірного та тривимірного просторових розподілень коефіцієнта теплового випромінювання ε поверхні досліджуваних пластин нержавіючої сталі (рис. 11) та визначено, що у випадку, коли пластина піддавалася попередній обробці, суть якої полягала у нагріванні пластини від одного газового нагрівача, через що на її поверхні виникли кольори мінливості, коефіцієнт теплового випромінювання змінюється в істотно більш широкому діапазоні $\varepsilon(x_p) = 0,4 \dots 0,9$, ніж, коли така обробка не проводилась $\varepsilon(x_p) = 0,45 \dots 0,65$, що, в свою чергу, підтверджує достовірність отриманих результатів.

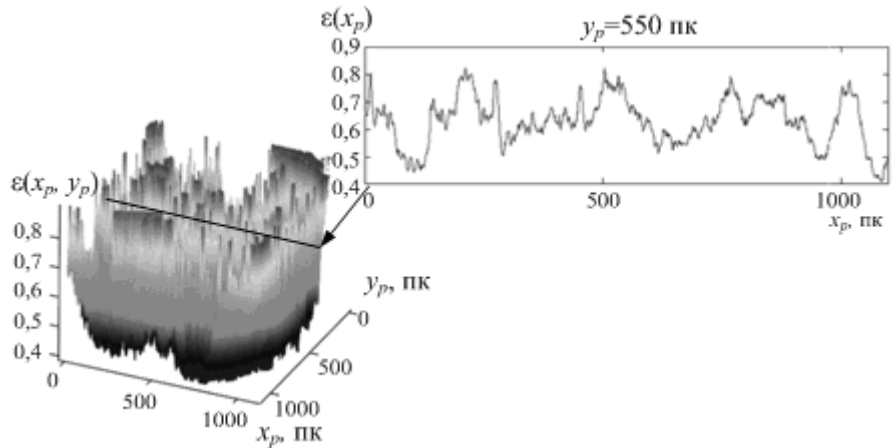
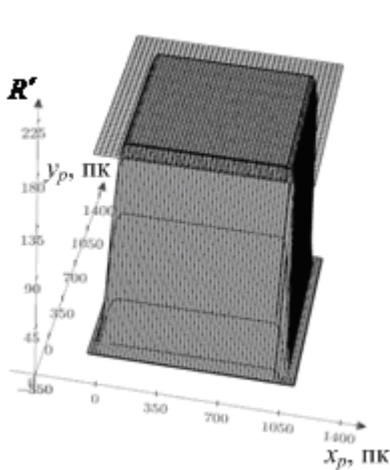


Рисунок 10 – Моделювання температурного поля на поверхні МП

Рисунок 11 – Одномірне та двомірне просторові розподілення коефіцієнта теплового випромінювання ε поверхні досліджуваних пластин

У **додатках** наведено області застосування теплового виду неруйнівного контролю та технічні характеристики використовуваних ЦФ, алгоритми у програмних середовищах MathCAD та LabView, принципові схеми блоків розробленого індукційного нагрівача, додаткові відомості для здійснення процедури ТК металів запропонованим в роботі методом, отримані патенти України на корисні моделі, акти випробувань і впроваджень.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача розробки методу теплового контролю металів при температурах понад 600°C із використанням цифрового фотоапарата у якості детектора теплового випромінювання, що загалом дозволяє здешевити процедуру діагностики технічного стану об'єктів металургійної та машинобудівної галузей.

1. На підставі проведеного аналізу сучасного стану ТК та приладів для його здійснення підтверджено перспективність застосування цифрового фотоапарата для здійснення процедури ТК металів при температурах понад 600°C .

2. На підставі аналізу структури ЦФ і цифрових матриць ПЗЗ та КМОН типів, що входять до його складу, виявлено можливість використання системи «ЦФ + об'єктив» у якості детектора теплового випромінювання металів в результаті їх високотемпературного нагріву.

3. Обґрунтована процедура калібрування системи «ЦФ + об'єktiv» за допомогою еталону АЧТ, яка дозволила встановити залежність яскравісної його температури від інформативного параметру червоного компоненту цифрового зображення поверхні температурної стрічки АЧТ.

4. Встановлено перелік основних факторів, що заважають при проведенні процедури калібрування ЦФ за допомогою АЧТ та визначені значення похибок вимірювань яскравісної температури, які обумовлені даними факторами.

5. На основі теоретичних положень цифрового фотографічного методу теплового контролю металів розроблено програмні алгоритми обробки даних у середовищі MathCAD, які дозволяють визначити розподіл значень істинних температур на поверхні металу та розрахувати значення абсолютного та відносного температурних контрастів викликаних впливом дефектів.

6. Обґрунтовані теоретичні положення для вирішення додаткових завдань ТК металів та розроблені програмні алгоритми обробки даних у середовищі MathCAD, які дозволяють визначити значення питомої масової теплоємності металів у певному інтервалі температур, побудувати моделі температурних полів на поверхні металів в певний необхідний момент часу в залежності від теплового впливу певної кількості однакових за параметрами нагрівачів, встановити розподіл значень коефіцієнту випромінювальної здатності поверхні металів.

7. Експериментальним шляхом, за рахунок розроблених програмних алгоритмів автоматичного керування процесом інтервальної зйомки та налаштуваннями ЦФ у програмних середовищах LabView і Sing of Misery, отримано термофільми поверхні металів різних за геометричними розмірами і складом та ідентифіковано присутні дефекти, визначені значення питомої масової теплоємності, побудовані моделі температурних полів, встановлено розподіл значень коефіцієнту випромінювальної здатності.

8. Отримані результати лабораторних та дослідно-промислових випробувань (ТОВ «Виробниче об'єднання Сплав-500», ТОВ «ГТ», м. Харків) довели високу технічну та економічну доцільність розробленого цифрового фотографічного методу теплового контролю металів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Славков В. Н. Исследование метода определения точечных оценок температурных полей локальных объектов / А. П. Давиденко, В. Н. Славков // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП». – 2008. – № 57. – С. 75 – 82.

Здобувачем описані математичні функції програмного пакету MathCAD для обробки температурних картин локальних об'єktiv.

2. Славков В. Н. Применение цифровой фотографии в задачах неразрушающего контроля / А. П. Давиденко, В. Н. Славков // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП». – 2009. – № 23. – С. 60 – 63.

Здобувачем проведені експериментальні дослідження дефектів металевих об'єktiv, виявлених за допомогою цифрового фотоапарата.

3. Славков В. Н. Анализ факторов влияния при измерении высоких температур цифровым фотоаппаратом / А. П. Давиденко, В. Н. Славков // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП». – 2010. – № 20. – С. 65 – 70.

Здобувачем виділено і описано основні фактори, що впливають на спосіб дослідження температурних полів за допомогою цифрового фотоапарата.

4. Славков В. Н. Возможность применения цифрового фотоаппарата в задачах световых измерений / А. П. Давиденко, А. Д. Купко, В. Н. Славков // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 11. – С. 27 – 33.

Здобувачем проаналізовано основні експериментальні дані отримані за допомогою цифрового фотоапарата при дослідженні ламп розжарювання електричних світловимірювальних.

5. Славков В. М. Аналіз характеристик світловимірювальних ламп розжарення за допомогою цифрового фотоапарата / В. М. Славков, О. П. Давиденко, О. Д. Купко // Світлотехніка та електроенергетика. – Харків: ХНАМГ. – 2011. – № 2. – С. 28 – 33. (видання індексується Google Scholar)

Здобувачем висунута гіпотеза про необґрунтованість вимог нормативної документації в області світловимірювальних ламп розжарювання.

6. Славков В. Н. Индукционный нагрев в задачах теплового неразрушающего контроля и при определении теплофизических свойств объектов / А. П. Давиденко, В. Н. Славков // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 57. – С. 77 – 82.

Здобувачем проведено аналіз конструктивних рішень індукційних нагрівачів та запропоновано конструкцію індукційного нагрівача для вирішення завдань теплового контролю за допомогою цифрового фотоапарата.

7. Славков В. М. Моделювання теплових полів об'єктів за допомогою програмного середовища MathCAD / В. М. Славков, О. П. Давиденко // Вісник Східноукраїнського Національного університету імені В. Даля. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля. – 2012. – №18(189). – С. 218 – 227.

Здобувачем проведені експериментальні дослідження, які показують можливість застосування запропонованого методу моделювання для визначення теплофізичних характеристик досліджуваних об'єктів.

8. Славков В. М. Визначення теплоємності металів за допомогою цифрового фотоапарата / В. М. Славков, М. О. Глушкова, О. П. Давиденко // Метрологія та прилади. – Харків: ВКФ «Фавор». – 2014. – №1(45). – С. 210 – 212.

Здобувачем запропоновано метод визначення теплоємності металів в результаті їх охолодження та розроблено структурну схему методу.

9. Славков В. М. Використання цифрового фотоапарату при активному тепловому контролі металів / В. М. Славков, О. П. Давиденко // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – 2014. – №2(33). – С. 13 – 19.

Здобувачем проведено моделювання температурного поля, яке створює один або декілька однакових газових нагрівачів на сталевій пластині та отримано його тривимірне графічне представлення.

10. Славков В. Н. Определение коэффициента излучения с помощью цифрового фотоаппарата при активном тепловом контроле металлов / В. Н. Славков, А. П. Давиденко // В мире неразрушающего контроля. – С.-Пб.: «СВЕН». – 2014. – №4(66). – С. 76 – 79.

Здобувачем розроблені методи та алгоритми визначення просторового розподілення коефіцієнту випромінювання металів та побудовані двомірне та тривимірне графічні представлення коефіцієнта випромінювання.

11. Пат. 90802 Україна, МПК G01N 25/20. Спосіб визначення теплоємності металів / Славков В. М., Давиденко О. П., Кондрашов С. І.; заявник та власник патенту НТУ «ХП». – № u 201400202; заявл. 13.01.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.

Здобувачем проведена обробка цифрових фотографій в системі комп'ютерного моделювання MathCAD за допомогою винайденого способу визначення теплоємності металів.

12. Пат. 90803 Україна, МПК G01N 21/88. Спосіб неруйнівного фотографічного контролю металів / Славков В. М., Давиденко О. П., Кондрашов С. І.; заявник та власник патенту НТУ «ХП». – № u 201400209; заявл. 13.01.2014; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.

Здобувачем виконаний патентний пошук при винайденні способу неруйнівного фотографічного контролю металів.

13. Славков В. Н. Применение пакета MathCAD для исследования теплофизических свойств материалов / А. П. Давиденко, В. Н. Славков // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І. – Харків, 20 – 22 травня 2009 р. – Харків, НТУ «ХП». – С. 435.

Здобувачем описані математичні функції програмного пакету MathCAD для обробки температурних картин локальних об'єктів, а також проаналізовані залежності змін форми і параметрів закону розподілу температури від теплофізичних властивостей металів.

14. Славков В. Н. Применение цифровой фотографии в задачах температурных измерений / А. П. Давиденко, В. Н. Славков // Приборостроение – 2009: Матеріали 2-й Международной научно-технической конференции. – Минск, 11 – 13 ноября 2009 г. – Минск: БНТУ. – С. 170 – 171.

Здобувачем отримані нормовані характеристики розподілу температур для металів різних за складом та геометричними розмірами.

15. Славков В. М. Методика визначення метрологічних характеристик цифрового фотоапарату при вимірюванні температури / В. М. Славков, А. П. Давиденко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ. – Харків, 12 – 14 травня 2010 р. – Харків, НТУ «ХП». – С. 134.

Здобувачем розроблена методика настроювання та калібрування цифрового фотоапарата за допомогою еталона абсолютно чорного тіла і контактних засобів вимірювання температури.

16. Славков В. М. Особливості застосування цифрової фотографії при вимірюванні температури / О. П. Давиденко, В. М. Славков // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія – 2010): Наукові праці VII Міжнародної науково-технічної конференції, Т.1. – Харків, 12-14 жовтня 2010 р. – Харків: ННЦ «Інститут метрології». – С. 331 – 333.

Здобувачем встановлені основні операції обробки цифрових зображень температурних полів об'єктів за допомогою процесору цифрового фотоапарата.

17. Славков В. Н. Цифровая обработка изображений температурных полей объектов / В. Н. Славков, А. П. Давиденко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІ. – Харків, 01 – 03 червня 2011 р. – Харків, НТУ «ХП». – С. 131.

Здобувачем проведено аналіз результатів експериментальних досліджень направлених на оцінку впливу формату стиснення цифрових зображень.

18. Славков В. Н. Анализ современного состояния теплового неразрушающего контроля. Фотографический метод ТНК / А. П. Давиденко, В. Н. Славков // Автоматизация: проблеми, ідеї, рішення: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Севастополь, 05 – 09 вересня 2011 р. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – С. 182 – 183.

Здобувачем проведено аналіз технологічних процесів металургійного та машинобудівного виробництва та встановлені температурні діапазони контрольованих об'єктів.

19. Славков В. М. 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. II. – Харків, 15 – 17 травня 2012 р. – Харків, НТУ «ХП». – С. 105.

Здобувачем в результаті автоматизації розрахунків, встановлені значення істинної термодинамічної температури об'єктів.

20. Славков В. М. Моделювання інформаційно-вимірювальної системи контролю теплових полів / В. М. Славков, О. П. Давиденко // Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів: Матеріали XI Міжнародній науково-технічній конференції. – Кременчук, 02 – 04 листопада 2012 р. – Кременчук, КНУ ім. М. Остроградського. – С. 179 – 180.

Здобувачем синтезована математична модель інформаційно-вимірювальної системи контролю теплових полів.

21. Славков В. М. Фотографічний спосіб моделювання теплових полів об'єктів / В. М. Славков, О. П. Давиденко // Современные тенденции развития приборостроения: Сборник тезисов докладов Первой Всеукраинской научно-технической конференции. – Луганск, 19 – 20 ноября 2012 г. – Луганск, ВНУ им. Даля. – С. 268 – 269.

Здобувачем проаналізована структура субпікселя ПЗЗ матриці цифрового фотоапарата.

22. Славков В. М. Аналіз спектральної характеристики цифрового фотоапарата Nikon D90 / В. М. Славков, О. П. Давиденко, О. П. Овчаренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II. – Харків, 29 – 31 травня 2013 р. – Харків, НТУ «ХП». – С. 132.

Здобувачем встановлена спектральна характеристика цифрового фотоапарата Nikon D90 за допомогою універсального монохроматора УМ-2.

23. Славков В. М. Просторове моделювання теплових полів джерел нагріву / Г. І. Гордієнко, В. М. Славков // Системи – 2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань: Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – Львів, 23 – 27 вересня 2013 р. – Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 145.

Здобувачем досліджено параметри газового нагрівача та здійснено моделювання теплового поля від певної кількості таких нагрівачів.

24. Славков В. М. Методика калібрування цифрового фотоапарату Canon EOS 20D / В. М. Славков, Г. І. Гордієнко // Актуальные проблемы автоматизации и приборостроения Украины: Материалы научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Харьков, 12 – 13 декабря 2013 г. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – С. 23 – 26.

Здобувачем здійснено обробку R, G, B рівнів зображень отриманих за допомогою цифрового фотоапарата Canon EOS 20D.

25. Славков В. М. Автоматична пакетна обробка зображень теплових полів за допомогою програмних середовищ PHOTOSHOP ТА MathCAD / В. М. Славков, О. П. Давиденко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції, Ч. II. – Харків, 15 – 17 жовтня 2014 р. – Харків, НТУ «ХП». – С. 140.

Здобувачем розроблено алгоритм автоматичної пакетної обробки зображень теплових полів за допомогою вбудованого обробника зображень Photoshop.

АНОТАЦІЇ

Славков В.М. Розробка цифрового фотографічного методу теплового контролю металів при високих температурах. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2015 р.

Дисертацію присвячено розробці методу теплового контролю металів при температурах понад 600 °С із використанням, у якості детектора теплового випромінювання, цифрового фотоапарата. На основі встановлених теоретичних положень методу розроблені програмні алгоритми обробки цифрових зображень, що дозволили: провести процедуру калібрування цифрового фотоапарата у діапазоні яскравісних температур 500...1800 °С та встановити калібрувальні залежності у вигляді математичних рівнянь; здійснити тепловий контроль металевих пластин, об'ємних металевих зразків та встановити присутні в них дефекти; вирішити додаткові задачі теплового контролю металів, а саме встановити значення питомої масової теплоємності металу; моделювати рівномірні температурні поля на поверхні металевих пластин; встановити розподілення коефіцієнта теплового випромінювання поверхні металевих пластин.

Ключові слова: теплові методи неруйнівного контролю, цифровий фотоапарат, яскравісна пірометрія, калібрування цифрового фотоапарата, безконтактне вимірювання температури, термографія, модель теплового поля, теплоємність, коефіцієнт випромінювальної здатності.

Славков В.Н. Разработка цифрового фотографического метода теплового контроля металлов при высоких температурах. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2015 г.

Диссертация посвящена разработке метода теплового контроля металлов при температурах свыше 600 °С с использованием, в качестве детектора теплового излучения, цифрового фотоаппарата. Показано, что активный пиксель цифрового фотоаппарата является единичным элементом твердотельной решетки, обладающий фотоэлектрической передаточной функцией при действии светового электромагнитного излучения. Вследствие чего, световой поток, который возникает за счет теплового излучения от объекта контроля (металла), и характеризуется своей энергетической яркостью, можно зафиксировать с помощью матрицы цифрового фотоаппарата, то есть установить распределение яркостной температуры на поверхности металла. На основе установленных теоретических положений метода разработаны программные алгоритмы обработки цифровых изображений, которые позволили провести процедуру калибровки цифрового фотоаппарата в диапазоне яркостных температур

500...1800 °C и установить калибровочные зависимости в виде математических уравнений. Экспериментальным путем, получены калибровочные таблицы и разработаны рекомендации по определению оптимальных параметров настроек цифрового фотоаппарата в зависимости от предполагаемого диапазона температур поверхности металла в процессе его теплового контроля. В результате проведения процедуры теплового контроля металлических пластин с использованием цифрового фотоаппарата установлена трехмерная картина температурного поля, по характеру которой можно обнаружить присутствуют дефекты. Полученные распределения температур контролируемой поверхности объемных металлических образцов с помощью цифрового фотоаппарата позволили построить 2D (контурные) и 3D (трехмерные) графики для каждого момента фотографирования, вид которых отображает присутствующие внутренние дефекты. Для решения дополнительных задач теплового контроля установлены значения удельной массовой теплоемкости железа в диапазоне температур 600...670 °C, разработан алгоритм в программной среде MathCAD, который позволяет моделировать температурные поля на поверхности металлической пластины, а также рассчитать количество нагревателей необходимых для получения равномерного нагрева пластины и расстояние их удаления друг от друга. Установлено пространственное распределение коэффициента теплового излучения поверхности исследуемых пластин металла. Опытные-промышленные испытания разработанного метода теплового контроля металлов с использованием цифрового фотоаппарата показали его высокую эффективность и экономическую целесообразность применения.

Ключевые слова: тепловые методы неразрушающего контроля, цифровой фотоаппарат, яркостная пирометрия, калибровка цифрового фотоаппарата, бесконтактное измерение температуры, термография, модель теплового поля, теплоемкость, коэффициент излучательной способности.

Slavkov V.N. Development of digital photographic method of thermal control metals at high temperatures. Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.11.13 – devices and methods of testing and materials composition determination. – National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute", Kharkiv, 2015.

The dissertation is devoted to development of a thermal control metals method at temperatures above 600 °C using as thermal radiation detector, digital camera. On the basis of the established method of theoretical positions were developed software algorithms for digital image processing that allowed: to carry a digital camera calibration brightness temperature in the range of 500...1800 °C and set the calibration curve in the form of mathematical equations; perform thermal control of metal plates, bulk metallic samples and established the presence of defects; to solve additional tasks of thermal metals control, namely to establish the value of the specific heat capacity of the metal mass; simulate uniform temperature field on the surface of the metal plates;

determine the distribution coefficient of thermal radiation from the metal plates surface.

Key words: thermal NDT methods, digital camera, brightness pyrometry, calibrated digital camera, contactless temperature measurement, thermography, thermal field model, heat capacity, emissivity.

A handwritten signature in black ink, located in the bottom right corner of the page. The signature is stylized and appears to consist of several connected loops and strokes, possibly representing the initials 'P. S.' or a similar name.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. 248-15.
Підписано до друку 13.07.15. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ®
ИЗДАТ
ТИПОГРАФИЯ
www.stil-izdat.com