ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ВЕЛИЧИН

ВПЛИВ ВИПРОМІНЮВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ НА МЕТОДИЧНІ ПОХИБКИ ДВОКОЛЬОРОВОЇ КОМПЕНСАЦІЙНОЇ ТА КЛАСИЧНОЇ ТЕРМОМЕТРІЇ

INFLUENCE OF METAL ALLOYS RADIATIVE CHARACTERISTICS ON METHODICAL ERRORS OF TWO-COLOR COMPENSATIVE AND CLASSICAL THERMOMETRY

Жуков Л. Ф., д-р техн. наук, гол. наук. співробітник,
Петренко Д. О., мол. наук. співробітник.
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ, Україна;
e-mail: dima-petrenko@meta.ua

Leonid Zhukov, DcSc, Chief Res. Fellow, Petrenko DO, Jr Res. Fellow.
Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine;
e-mail: dima-petrenko@meta.ua

https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.03.039

Анотація. Досліджено методичні похибки двокольорової компенсаційної та класичної енергетичної й спектрального відношення пірометрії випромінювання під впливом змінних випромінювальних характеристик металевих сплавів. Випромінювальні характеристики кількісно оцінено за допомогою середнього рівня випромінювальної здатності та коефіцієнта селективності. Середніми (настроювальними) значеннями цих параметрів вибрано такі, що відповідають вольфраму в вакуумі за температури 1600 К (за довжин хвиль 0,7 та 0,9 мкм), а діапазони їх змін – відповідно до умов в металургійних печах та в агрегатах. Відповідно до настроювальних значень випромінювальних характеристик введено поправки в математичні моделі класичної, а також двокольорової компенсаційної пірометрії випромінювання і розраховано методичні похибки. На основі аналізу математичних моделей методів пірометрії випромінювання встановлено закономірності впливу середнього рівня випромінювальної здатності та коефіцієнта селективності на методичні похибки. На відміну від класичної пірометрії випромінювання, методичні похибки двокольорової компенсаційної термометрії практично не залежать від коефіцієнта селективності. Це є перевагою двокольорової компенсаційної термометрії та дає змогу мінімізувати похибки безконтактних вимірювань температури металевих сплавів, вкритих прозорими та напівпрозорими оксидними плівками, які спричиняють істотні зміни коефіцієнта селективності. Визначено відхилення середнього рівня випромінювальної здатності від настроювального, за яких модулі методичних похибок двокольорової компенсаційної термометрії не перевищують 1,0 % та 0,5 %. Вони становлять ±0,042 та ±0,020, відповідно. У металургії найпоширеніший комплексний вплив випромінювальних характеристик на методичні похибки оптичної термометрії. Тому, залежно від співвідношення випромінювальних характеристик, змінюватиметься співвідношення похибок досліджених методів. Визначено функціональну залежність коефіцієнта селективності від середнього рівня випромінювальної здатності, за якої похибки всіх розглянутих методів рівні. Під комплексним впливом середнього рівня випромінювальної здатності та селективності її спектрального розподілу похибки двокольорової компенсаційної пірометрії випромінювання менші від похибок класичної інфрачервоної енергетичної пірометрії випромінювання, а також термометрії спектрального відношення відповідно в 1,04–1,26 та 1,21–1,57 разу.

Ключові слова: двокольорова компенсаційна пірометрія випромінювання, випромінювальні характеристики, температура, металеві сплави, методична похибка.

Abstract. Investigations of methodical errors of two-color compensative and classical energy and spectral ratio pyrometry are performed under conditions of changeable radiative characteristics of metal alloys. To quantitatively estimate the radiative characteristics we proposed such parameters as an average level of emissivity and selectivity factor. As average (adjustment) values of these parameters we chose the values, which correspond to tungsten in vacuum with temperature 1600 K (for wavelengths 0.7 and 0.9 μm). The ranges of changes of these parameters correspond to metallurgical furnaces and aggregates conditions in optimal sighting zones. In accordance with adjustment values of radiative characteristics the corrections in mathematical models of classical and two-color compensative thermometry were made. On the base of analysis of thermometry methods mathematical models influence regularities of emissivity average level and selectivity coefficient on methodical errors are established. As distinct from classical thermometry, methodical errors of two-color compensative thermometry practically don't depend on selectivity factor. This fact is advantage of two-color compensative thermometry. In such a way we can minimize the errors of contactless temperature measurements of metal alloys coated by transparent and semitransparent oxide films. These films

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

cause significant changes in the selectivity factor. The deviations of average level of emissivity from adjustment value which cause methodical errors absolute values 1.0 % and 0.5 % are determined. They are ±0.042 and ±0.020, correspondingly. The complex influence of radiative characteristics on methodical errors of optical thermometry is the most widespread in metallurgy. That is why the ratio of investigated methods errors will change depending on ratio of radiative characteristics. The function between the selectivity factor and the average level of emissivity which demands the equality of methodical errors of all investigated methods is determined. Under the complex influence of average level of emissivity and selectivity factor the errors of two-color compensative thermometry are lower than the errors of infrared classical energy and spectral ratio thermometry in 1.04–1.26 and 1.21–1.57 times, respectively.

Key words: Two-color compensative thermometry, Radiative characteristics, Temperature, Metal alloys, Methodical error.

Вступ

Термометричні оптичні характеристики речовин у конденсованому стані, зокрема металевих розплавів та сплавів, визначаються розподілами їх випромінювальної здатності за спектром хвиль теплового електромагнітного випромінювання. Стосовно двокольорової оптичної термометрії, випромінювальні характеристики об'єктів температурного контролю, зокрема, металевих сплавів, можна кількісно оцінити, спираючись на значення монохроматичних випромінювальних здатностей ε_{λ_1} і ε_{λ_2} на робочих хвилях λ_1 і λ_2, відповідно. Як параметри для кількісної оцінки випромінювальних характеристик запропоновано середній рівень $(\varepsilon_{\text{ср.}}=(\varepsilon_{\lambda_1}+\varepsilon_{\lambda_2})/2)$ і коефіцієнт селективності $(k=\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2})$ спектральних розподілів випромінювальної здатності. На відміну від металів, випромінювальні характеристики їх оксидів, карбідів, боридів, нітридів, силіцидів, а також графітів значно стабільніші у звичайній атмосфері та сприяють широкому використанню оптичної термометрії.

У вакуумі чи інертному середовищі ці характеристики металевих сплавів у твердому стані визначаються їх хімічним складом і неметалевими включеннями, а в звичайній атмосфері – додатково інтенсивністю та напрямом окиснювально-відновних процесів взаємодії сплавів з цією атмосферою. У вакуумі чи інертному середовищі на термометричні оптичні характеристики металевих сплавів у рідкому стані додатково впливають інтенсивність їх перемішування, взаємодія з футерівкою та час витримки, а в звичайній атмосфері – інтенсивність перемішування, час витримки, інтенсивність і напрям окиснювально-відновних процесів взаємодії розплавів з футерівкою та атмосферою [1].

Недоліки

Застосування класичної пірометрії випромінювання дає змогу виключити методичну складову похибки в тому випадку, коли випромінювальні характеристики сплаву відомі у деяких граничних станах, а в проміжних станах між ними існує функціональна залежність, наприклад, $\varepsilon_{\text{ср.}}=f(k)$ [2, 3]. Але така залежність існує лише у деяких технологічних процесах, наприклад, холодній прокатці чи цинкуванні сталі [2]. Також потребують уточнення відхилення від цієї залежності, за яких методична похибка не перевищуватиме заданої.

Під комплексним впливом багатьох факторів середній рівень та коефіцієнт селективності спектрального розподілу випромінювальної здатності можуть випадково змінюватися в широких межах [1]. Л. Ф. Жуков експериментально встановив, що, наприклад, під час термоконтролю рідкого металу в струмені чи потоці під час випускання чи зливання з металургійних печей та агрегатів під впливом інтерференції випромінювання на прозорих та частково прозорих оксидних плівках спектральні розподіли випромінювальної здатності можуть змінюватися від зростання ($k<1$), через сірі ($k=1$), до спадання ($k>1$). Під час вимірювання температури рідкого чавуну на випуску з вагранки середній рівень випромінювальної здатності в спектральному діапазоні 0,69–0,96 мкм змінювався від 0,41 до 0,66. Нестабільність випромінювальних характеристик сплавів призводить до відсутності інформації про точні значення випромінювальної здатності на робочих хвилях у кожному конкретному випадку пірометричних вимірювань. Це, своєю чергою, спричиняє значні методичні похибки класичної пірометрії випромінювання, що істотно обмежує область її практичного застосування. Для зниження методичних похибок рекомендують застосовувати багатокольорову пірометрію випромінювання, але вона доволі дорога з погляду практичної реалізації, має недоліки щодо інструментальних похибок [4] і тому не розглядатиметься в цій роботі.

Чутливість оптичної термометрії до змін випромінювальних характеристик визначається застосованим у методі алгоритмом оброблення первинної пірометричної інформації. Наприклад, пірометрія випромінювання спектрального відношення реагує на зміну коефіцієнта селективності. Тому для мінімізації похибок температурного контролю необхідно враховувати специфіку поведінки випромінювальних характеристик об'єкта контролю у кожному конкретному випадку.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Мета роботи

Метою роботи є вивчення впливу випромінювальних характеристик металевих сплавів на методичні похибки двокольорової компенсаційної пірометрії випромінювання (ДКПВ), а також класичної пірометрії випромінювання: однокольорової та спектрального відношення. При цьому випромінювальні характеристики змінюються випадково в деяких межах, що відповідає промисловим умовам.

Матеріали та методи

Для практичного використання двокольорової компенсаційної, а також класичної пірометрії випромінювання потрібна апріорна інформація про границі змін випромінювальних характеристик контрольованого об'єкта. Відповідно до цього визначають настроювальні параметри, котрі вводять в алгоритми оброблення первинної пірометричної інформації того чи іншого методу оптичної термометрії. Наприклад, під час адаптації безконтактного термоконтролю на металургійних печах та агрегатах визначають зони візування доступної поверхні розплаву із відхиленнями середнього рівня випромінювальної здатності від настроювального, що не перевищують 0,1 (рис. 1).

Границі значень коефіцієнта селективності істотно перекривають реальні значення k для найпоширеніших у металургії залізовуглецевих сплавів у оптимальних зонах візування. Настроювальні значення середнього рівня випромінювальної здатності $\varepsilon_{\text{ср.н}} = 0,417$ і коефіцієнта селективності $k_{\text{н}} = 1,093$ відповідають вольфраму в вакуумі з T=1600 К у спектральному діапазоні 0,7–0,9 мкм [5]. Випромінювальні характеристики вольфраму репрезентативні для залізовуглецевих сплавів, детально вивчені й відображені в літературі з оптики металів і оптичної термометрії. На рис. 1 пунктиром показано досліджені спектральні розподіли випромінювальної здатності для $\varepsilon_{\text{ср.н}} = 0,417$, а також $\varepsilon_{\text{ср.н}} = 0,317$ і $\varepsilon_{\text{ср.н}} = 0,517$ за $k_{\min} = 1,000$ та $k_{\max} = 1,186$. Штрихпунктиром відображено зміщені по $\varepsilon_{\text{ср.}}$ на ±0,1, відносно настроювального розподілу, спектральні розподіли за $k_{\text{н}} = 1,093$. Оскільки дослідження виконано на робочих хвилях λ_1 і λ_2, то в діапазоні між ними розподіли випромінювальної здатності умовно показано лінійними. На практиці в цьому спектральному діапазоні реальний розподіл вольфраму, як і розподіли інших металів та їх сплавів, не є строго лінійним. Суцільною лінією показано настроювальний спектральний розподіл вольфраму. На робочих хвилях йому відповідають значення випромінювальної здатності $\varepsilon_{\lambda_1 \text{н}} = 0,436$ і $\varepsilon_{\lambda_2 \text{н}} = 0,399$. Відповідно до них введено поправки для класичної енергетичної та спектрального відношення, а також для двокольорової компенсаційної пірометрії випромінення (див. таблицю).

З використанням наведених спектральних розподілів випромінювальної здатності, а також отриманих із формули Віна рівнянь вимірювань виконано розрахунки методичних похибок двокольорової компенсаційної, а також класичної енергетичної та спектрального відношення пірометрії випромінювання.

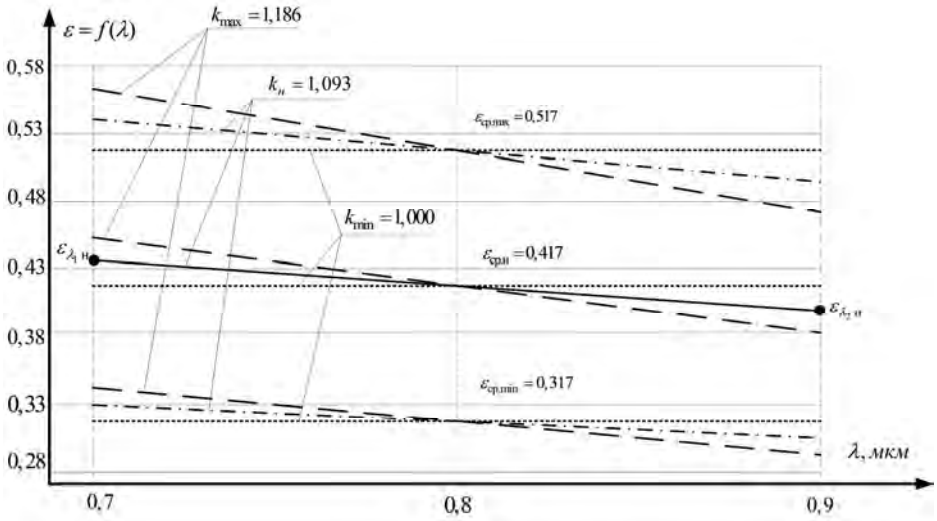

Рис. 1. Досліджені спектральні розподіли випромінювальної здатності

Fig. 1. Investigated spectral distributions of emissivity

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Рівняння вимірювань для досліджених методів оптичної термометрії

Measurement equations for investigated methods of optical thermometry

Методи пірометрії випромінювання	Рівняння вимірювань
Однокольорова на λ_1	$T_{\lambda 1} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{S_1(T,\varepsilon_{\lambda_1})} + \dfrac{\lambda_1}{C_2}\ln(\varepsilon_{\lambda_1 н})}$
Однокольорова на λ_2	$T_{\lambda 2} = \dfrac{1}{\dfrac{1}{S_2(T,\varepsilon_{\lambda_2})} + \dfrac{\lambda_2}{C_2}\ln(\varepsilon_{\lambda_2 н})}$
Спектрального відношення на $\lambda_{екв}$	$T_{СВ} = \dfrac{1}{\lambda_{экв}\left(\dfrac{1}{\lambda_1 S_1(T,\varepsilon_{\lambda_1})} - \dfrac{1}{\lambda_2 S_2(T,\varepsilon_{\lambda_2})} + \dfrac{\ln(k_н)}{C_2}\right)}$; $\lambda_{екв} = \dfrac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$
Двокольорова компенсаційна	$T_{ДКПВ} = \dfrac{2}{\dfrac{1}{S_{2ц}} + \dfrac{1}{S'_{2ц}}}$; де $S_{2ц} = \dfrac{1}{\lambda_{екв}\left(\dfrac{1}{\lambda_1 \cdot S_1(T,\varepsilon_{\lambda_1})} - \dfrac{1}{\lambda_2 \cdot S_2(T,\varepsilon_{\lambda_2})}\right)}$; $S'_{2ц} = \dfrac{1}{\lambda_{екв}\left(\dfrac{1}{\lambda_1 \cdot S'_1} - \dfrac{1}{\lambda_2 \cdot S'_2}\right)}$; $S'_1 = \dfrac{S_2(T,\varepsilon_{\lambda_2})C_2}{S_2(T,\varepsilon_{\lambda_2})\ln(\varepsilon_{\lambda_2 н})(\lambda_2 - \lambda_1) + C_2}$; $S'_2 = \dfrac{-S_1(T,\varepsilon_{\lambda_1})C_2}{S_1(T,\varepsilon_{\lambda_1})\ln(\varepsilon_{\lambda_1 н})(\lambda_2 - \lambda_1) - C_2}$.

$C_2 = 0,014388$ К·м – друга стала Планка; $S_1(T,\varepsilon_{\lambda_1})$ – виміряна однокольорова температура випромінювання на λ_1; $S_2(T,\varepsilon_{\lambda_2})$ – виміряна однокольорова температура випромінювання на λ_2; $T_{\lambda 1}$ – температура, розрахована коригуванням на $\varepsilon_{\lambda_1 н}$ однокольорової температури випромінювання $S_1(T,\varepsilon_{\lambda_1})$; $T_{\lambda 2}$ – температура, розрахована коригуванням на $\varepsilon_{\lambda_2 н}$ однокольорової температури випромінювання $S_2(T,\varepsilon_{\lambda_2})$; $T_{СВ}$ – температура, розрахована коригуванням на $k_н$ температури випромінювання спектрального відношення $S_{2ц}$; $T_{ДКПВ}$ – температура, розрахована відповідно до двокольорової компенсаційної пірометрії випромінювання.

Результати і обговорення

Встановлені закономірності впливу середнього рівня випромінювальної здатності на відносні методичні похибки двокольорової компенсаційної пірометрії випромінювання ($\delta T_{ДКПВ}$), а також енергетичної однокольорової на λ_1 і λ_2 (δT_{λ_1} і δT_{λ_2}) і спектрального відношення на $\lambda_{екв}$ ($\delta T_{СВ}$) термометрії наведено на рис. 2.

За модулем похибки досліджених методів розташовані у такій послідовності: $|\delta T_{\lambda_1}| < |\delta T_{ДКПВ}| < |\delta T_{\lambda_2}|$, причому $\delta T_{ДКПВ} = \dfrac{\delta T_{\lambda_1} + \delta T_{\lambda_2}}{2}$. Це пояснюється тим, що для ДКПВ дзеркальні однокольорові температури випромінювання S'_1 і S'_2 розраховують з використанням настроювальних значень випромінювальної здатності. Такий спосіб розрахунку в принципі еквівалентний усередненню скоригованих однокольорових температур випромінювання $T_{\lambda 1}$ і $T_{\lambda 2}$.

У разі зміни $\varepsilon_{ср.}$ від 0,317, через $\varepsilon_{ср.н} = 0,417$, до 0,517 і T=1600 К похибка ДКПВ за модулем відповідно зменшується від 2,38 до 0,00 %, а потім зростає до 1,95 %. Ця закономірність пояснюється температурною поправкою, яка обнулює методичну похибку за $\varepsilon_{ср.} = \varepsilon_{ср.н}$. Зміна середнього рівня випромінювальної здатності відносно настроювального рівня зумовлює зміни ε_{λ_1} і ε_{λ_2} відносно $\varepsilon_{\lambda_1 н}$ і $\varepsilon_{\lambda_2 н}$. Це викликає "різнознакові" і відмінні за модулем похибки визначення дзеркальних однокольорових температур випромінювання. Розглянемо детально вплив цих похибок на похибку визначення температури за ДКПВ.

Похибка $\Delta S'_1$ для дзеркальної однокольорової температури випромінювання S'_1 визначається виразом [1]

$$\Delta S'_1 = S'_{1р} - S'_1 = \frac{S_2(T,\varepsilon_{\lambda_2})\cdot C_2}{S_2(T,\varepsilon_{\lambda_2})\cdot\ln(\varepsilon_{\lambda_2 н})\cdot(\lambda_2-\lambda_1)+C_2} - \frac{S_2(T,\varepsilon_{\lambda_2})\cdot C_2}{S_2(T,\varepsilon_{\lambda_2})\cdot\ln(\varepsilon_{\lambda_2})\cdot(\lambda_2-\lambda_1)+C_2}, \quad (1)$$

де $S'_{1р}$ – розрахункова дзеркальна однокольорова температура випромінювання на λ_1 для $\varepsilon_{\lambda_2 н}$; S'_1 – дзеркальна однокольорова температура випроміню-

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

вання на λ_1, яка відповідає реальному ε_{λ_2}, відмінному від $\varepsilon_{\lambda_2 \text{н}}$.

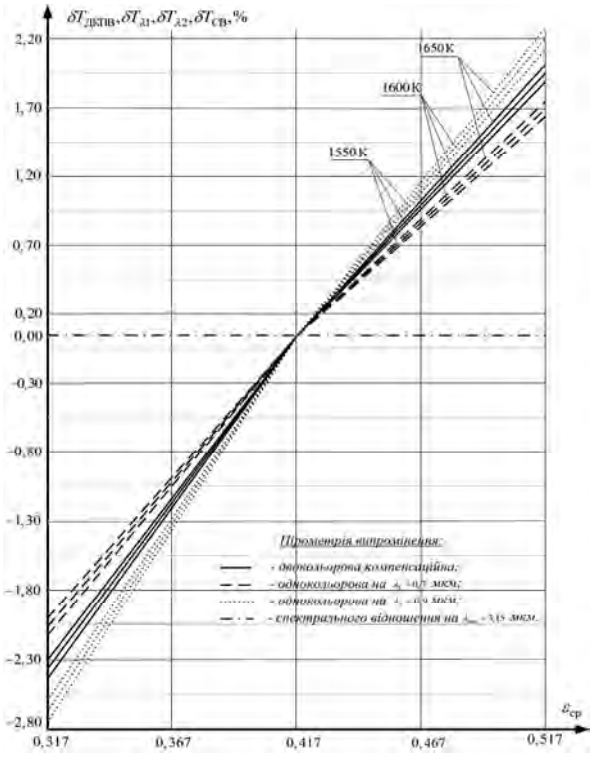

Рис. 2. Залежності методичних похибок пірометрії випромінювання від $\varepsilon_{\text{ср.}}$ *за різних температур та* $k = k_{\text{н}} = 1{,}093$

Fig. 2. Dependences of radiation pyrometry methodical errors on the $\varepsilon_{\text{av.}}$ *for different temperatures and* $k = k_{adj} = 1{,}093$

Якщо $\varepsilon_{\text{ср.}} < \varepsilon_{\text{ср.н}}$, то $\varepsilon_{\lambda_2} < \varepsilon_{\lambda_2 \text{н}}$. Звідси випливає, що знаменник від'ємника в (1) менший за модулем, ніж знаменник зменшуваного, оскільки $\left|\ln(\varepsilon_{\lambda_2 \text{н}})\right| < \left|\ln(\varepsilon_{\lambda_2})\right|$ і, відповідно, $\Delta S_1^{'} < 0$. Якщо $\varepsilon_{\text{ср.}} > \varepsilon_{\text{ср.н}}$, то $\varepsilon_{\lambda_2} > \varepsilon_{\lambda_2 \text{н}}$. Тоді знаменник від'ємника в (1) більший за модулем, ніж знаменник зменшуваного, оскільки $\left|\ln(\varepsilon_{\lambda_2 \text{н}})\right| > \left|\ln(\varepsilon_{\lambda_2})\right|$ і $\Delta S_1^{'} > 0$.

Вираз похибки $\Delta S_2^{'}$ для дзеркальної однокольорової температури випромінювання на λ_2 має аналогічний вигляд

$$\Delta S_2^{'} = S_{2\text{р}}^{'} - S_2^{'} = \frac{-S_1(T,\varepsilon_{\lambda_1})\cdot C_2}{S_1(T,\varepsilon_{\lambda_1})\cdot \ln(\varepsilon_{\lambda_1 \text{н}})\cdot(\lambda_2-\lambda_1)-C_2} + \frac{S_1(T,\varepsilon_{\lambda_1})\cdot C_2}{S_1(T,\varepsilon_{\lambda_1})\cdot \ln(\varepsilon_{\lambda_1})\cdot(\lambda_2-\lambda_1)-C_2}, \quad (2)$$

де $S_{2\text{р}}^{'}$ – розрахункова дзеркальна однокольорова температура випромінювання на λ_2 для $\varepsilon_{\lambda_1 \text{н}}$; $S_2^{'}$ – дзеркальна однокольорова температура випромінювання на λ_2, яка відповідає реальному ε_{λ_1}, відмінному від $\varepsilon_{\lambda_1 \text{н}}$.

Якщо $\varepsilon_{\text{ср.}} < \varepsilon_{\text{ср.н}}$, то $\varepsilon_{\lambda_1} < \varepsilon_{\lambda_1 \text{н}}$. У результаті перший член виразу (2) є додатним і за модулем перевищує другий (від'ємний), тому $\Delta S_2^{'} > 0$. Якщо $\varepsilon_{\text{ср.}} > \varepsilon_{\text{ср.н}}$, то $\varepsilon_{\lambda_1} > \varepsilon_{\lambda_1 \text{н}}$. У результаті перший член виразу (2) є додатним і за модулем меншим, ніж другий (від'ємний), тому $\Delta S_2^{'} < 0$.

Оскільки $S_{1\text{р}}^{'} = S_1^{'} + \Delta S_1^{'}$ і $S_{2\text{р}}^{'} = S_2^{'} + \Delta S_2^{'}$, похибку $\Delta S_{2\text{ц}}^{'}$ для дзеркальної двокольорової температури випромінювання $S_{2\text{ц}}^{'}$ подамо таким виразом

$$\Delta S_{2\text{ц}}^{'} = S_{2\text{ц р}}^{'} - S_{2\text{ц}}^{'} = \frac{1}{\lambda_{екв}\left(\frac{1}{\lambda_1 \cdot S_{1\text{р}}^{'}} - \frac{1}{\lambda_2 \cdot S_{2\text{р}}^{'}}\right)} - \frac{1}{\lambda_{екв}\left(\frac{1}{\lambda_1 \cdot S_1^{'}} - \frac{1}{\lambda_2 \cdot S_2^{'}}\right)}, \quad (3)$$

де $S_{2\text{ц р}}^{'}$ – розрахункова дзеркальна двокольорова температура випромінювання на $\lambda_{екв}$ для $\varepsilon_{\lambda_1 \text{н}}$, $\varepsilon_{\lambda_2 \text{н}}$; $S_{2\text{ц}}^{'}$ – дзеркальна двокольорова температура випромінювання на $\lambda_{екв}$, яка відповідає реальним ε_{λ_1}, ε_{λ_2}, відмінним від $\varepsilon_{\lambda_1 \text{н}}$, $\varepsilon_{\lambda_2 \text{н}}$.

Якщо $\varepsilon_{\text{ср.}} < \varepsilon_{\text{ср.н}}$, $\Delta S_1^{'} < 0$ і $\Delta S_2^{'} > 0$, $\Delta S_{2\text{ц}}^{'} < 0$ і $\Delta T_{\text{ДКПВ}} < 0$. Якщо ж $\varepsilon_{\text{ср.}} > \varepsilon_{\text{ср.н}}$, $\Delta S_1^{'} > 0$ і $\Delta S_2^{'} < 0$, відповідно, $\Delta S_{2\text{ц}}^{'} > 0$ і $\Delta T_{\text{ДКПВ}} > 0$. Оскільки $\lambda_{екв}$ перевищує λ_1 і λ_2, то $\left|\Delta S_{2\text{ц}}^{'}\right| >> \left|\Delta S_1^{'}\right|$ і $\left|\Delta S_{2\text{ц}}^{'}\right| >> \left|\Delta S_2^{'}\right|$. Наприклад, за T=1600 К і $\varepsilon_{\text{ср.}} = 0{,}317$, маємо $\Delta S_1^{'} = -8{,}1$ К, $\Delta S_2^{'} = 7{,}9$ К, $\Delta S_{2\text{ц}}^{'} = -70{,}0$ К. За рахунок компенсації в алгоритмі ДКПВ похибка розрахунку температури об'єкта менша від похибки для дзеркальної двокольорової температури випромінювання приблизно в два рази. Для вказаних умов $\Delta T_{\text{ДКПВ}} = 38{,}0$ К (2,38 %).

Зі зростанням температури об'єкта контролю методичні похибки оптичної термометрії, зокрема ДКПВ, збільшуються. Це пояснюється тим, що, згідно з термодинамічними законами теплового випромінювання, водночас збільшується різниця між температурами об'єкта і його випромінювання. Ця різниця і визначає методичну похибку. Максимальний приріст похибки ДКПВ за рахунок збільшення температури об'єкта від 1550 до 1650 К спостерігається за мінімального середнього рівня випромінювальної здатності $\varepsilon_{\text{ср.}} = 0{,}317$ і становить 0,14 %. Такий вплив температури на методичну похибку є прямим, на відміну від опосередкованого,

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

коли температура впливає на оптичні характеристики випромінювальної поверхні, тобто на $\varepsilon_{\text{ср.}}$ та k.

У разі зростання $\varepsilon_{\text{ср.}}$ від 0,317, через 0,417, до 0,517 і T=1600 К похибка однокольорової пірометрії випромінювання на λ_1 за модулем відповідно зменшується від 2,09 до 0,00 %, а потім зростає від 0,00 до 1,70 % і визначається таким виразом [1]

$$\delta T_{\lambda_1} = -\frac{\lambda_1 \ln(\frac{\varepsilon_{\lambda_1 \text{н}}}{\varepsilon_{\lambda_1}})}{\lambda_1 \ln(\frac{\varepsilon_{\lambda_1 \text{н}}}{\varepsilon_{\lambda_1}}) + \frac{C_2}{T}}. \quad (4)$$

Якщо $\varepsilon_{\text{ср.}} < \varepsilon_{\text{ср.н}}$ $\varepsilon_{\lambda_1} < \varepsilon_{\lambda_1 \text{н}}$ і $\delta T_{\lambda_1} < 0$, а за $\varepsilon_{\text{ср.}} > \varepsilon_{\text{ср.н}}$ $\varepsilon_{\lambda_1} > \varepsilon_{\lambda_1 \text{н}}$ і $\delta T_{\lambda_1} > 0$, з підвищенням температури від 1550 до 1650 К за $\varepsilon_{\text{ср.}} = 0,317$ похибка додатково зростає на 0,13 %. Зі зростанням $\varepsilon_{\text{ср.}}$ від 0,317, через 0,417, до 0,517 і T=1600 К похибка однокольорової пірометрії випромінювання на λ_2 за модулем відповідно зменшується від 2,67 до 0,00 %, а потім зростає від 0,00 до 2,19 % і визначається виразом (4) для λ_2 і $\frac{\varepsilon_{\lambda_2 \text{н}}}{\varepsilon_{\lambda_2}}$. Під впливом довжини хвилі $|\delta T_{\lambda_2}| > |\delta T_{\lambda_1}|$. На цьому основані відомі рекомендації щодо використання короткохвильової енергетичної термометрії, які обмежуються значеннями вимірюваних температур і чутливістю детекторів випромінювання. Зі зростанням температури від 1550 до 1650 К за $\varepsilon_{\text{ср.}} = 0,317$ похибка збільшується на 0,16 %.

Похибка пірометрії спектрального відношення за заданих $\lambda_{екв}$ та $k_{\text{н}}$ залежить від коефіцієнта селективності випромінювання, а також від температури об'єкта і визначається формулою [1]

$$\delta T_{\text{СВ}} = -\frac{\lambda_{екв} \ln(\frac{k_{\text{н}}}{k})}{\lambda_{екв} \ln(\frac{k_{\text{н}}}{k}) + \frac{C_2}{T}}. \quad (5)$$

За умов досліджень, якщо $k = k_{\text{н}} = const$, $\delta T_{\text{СВ}} = 0$.

У металургійній практиці найпоширеніший комплексний вплив середнього рівня випромінювальної здатності та коефіцієнта селективності випромінювання на методичні похибки оптичної термометрії. Цей вплив відображено на рис. 3.

Аналіз отриманих результатів показує, що, на відміну від класичної енергетичної та спектрального відношення пірометрії випромінювання, за $\varepsilon_{\text{ср.}} = \varepsilon_{\text{ср.н}}$, похибки ДКПВ мінімальні та практично не залежать від селективності випромінювання. Цікаво, що в інтервалі значень $k_{\text{гр.1}} \le k \le k_{\text{гр.2}}$, залежно від комбінацій k та $\varepsilon_{\text{ср.}}$, виконуються такі співвідношення між похибками:

$$|\delta T_{\text{СВ}}| < |\delta T_{\lambda_1}| < |\delta T_{\text{ДКПВ}}| < |\delta T_{\lambda_2}|,$$

$$|\delta T_{\text{СВ}}| = |\delta T_{\lambda_1}| = |\delta T_{\text{ДКПВ}}| = |\delta T_{\lambda_2}|,$$

$$|\delta T_{\text{СВ}}| > |\delta T_{\lambda_1}| > |\delta T_{\text{ДКПВ}}| > |\delta T_{\lambda_2}|.$$

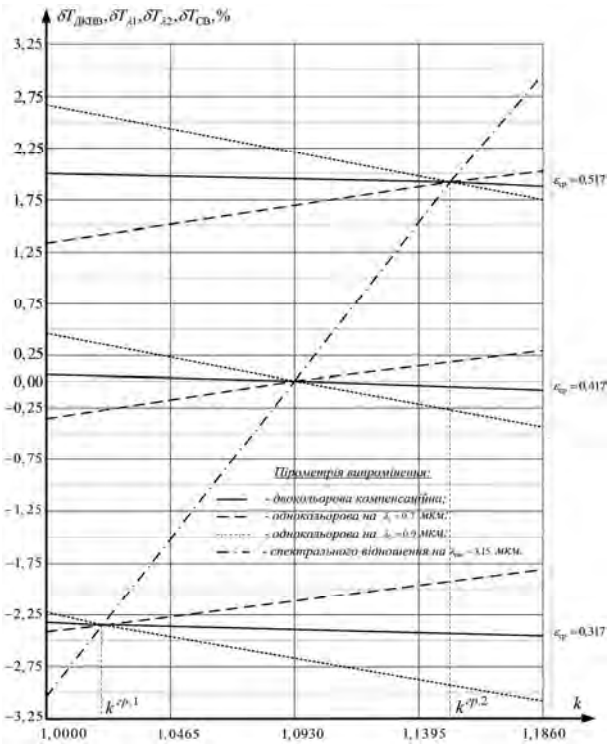

Рис. 3. Залежності методичних похибок пірометрії випромінювання від k за T=1600 K і різних $\varepsilon_{\text{ср.}}$

Fig. 3. Dependences of radiation pyrometry methodical errors on the k for T=1600 K and different $\varepsilon_{\text{av.}}$

За межами цього інтервалу однозначно $|\delta T_{\text{СВ}}| > |\delta T_{\lambda_1}| > |\delta T_{\text{ДКПВ}}| > |\delta T_{\lambda_2}|$. Отже, за $\varepsilon_{\text{ср.min}}$ і $k_{\min}$ похибка ДКПВ за модулем менша від похибок однокольорової на λ_1 і спектрального відношення на $\lambda_{екв}$ термометрії в 1,04 і 1,30 разу, відповідно, а похибка однокольорової термометрії на λ_2 за модулем менша від похибки ДКПВ в 1,04 разу. Якщо $\varepsilon_{\text{ср.min}}$ і $k_{\max}$, похибки однокольорової на λ_2 і спектрального відношення на $\lambda_{екв}$ термометрії перевищують похибку ДКПВ в 1,26 і 1,21 разу, відповідно, а похибка однокольорової термометрії на λ_1 менша від похибки ДКПВ в 1,36 разу. Якщо $\varepsilon_{\text{ср.max}}$; $k_{\min}$ та $\varepsilon_{\text{ср.max}}$; $k_{\max}$, похибки пірометрії спектрального відношення перевищують похибки ДКПВ у 1,34–1,57 разу, відповідно.

З рис. 3 випливає, що за $k_{\text{гр.1}} \le k \le k_{\text{гр.2}}$ і $\varepsilon_{\text{ср.min}} < \varepsilon_{\text{ср.}} < \varepsilon_{\text{ср.max}}$ для деякої залежності $k = f(\varepsilon_{\text{ср.}})$ похибки досліджених методів збігаються за модулем та знаком. Умова рівності похибок через значення

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

монохроматичних випромінювальних здатностей на робочих хвилях записується так

$$\varepsilon_{\text{к}} = \sqrt[\lambda_1-\lambda_2]{\frac{(\varepsilon_{\lambda_1})^{\lambda_1}}{(\varepsilon_{\lambda_2})^{\lambda_2}}} = \varepsilon_{\text{к. н}} = \sqrt[\lambda_1-\lambda_2]{\frac{(\varepsilon_{\lambda_1\text{н}})^{\lambda_1}}{(\varepsilon_{\lambda_2\text{н}})^{\lambda_2}}} = 0,2927 \cdot \qquad (6)$$

Величина, яка описується виразом (6), інваріантна до температури об'єкта і має назву кольорової випромінювальної здатності [3]. Отже, якщо $\varepsilon_{\text{к}} = \varepsilon_{\text{к. н}}$, то похибки досліджених методів рівні та лежать в діапазоні від –2,33 до 1,90 %. З (6) випливає, що за "сірого" випромінювання (k=1) $\varepsilon_{\text{к}} = \varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2} = \varepsilon_{\text{ср.}}$. У разі селективного випромінювання (k>1) у $\varepsilon_{\text{к}}$ закладено інформацію як про k, так і про $\varepsilon_{\text{ср.}}$. Переходячи до цих характеристик, умову рівності похибок (6) запишемо у вигляді

$$k = -0,6450 \cdot \varepsilon_{\text{ср.}}^2 + 1,1974 \cdot \varepsilon_{\text{ср.}} + 0,7055. \qquad (7)$$

Для знаходження коефіцієнтів функції (7) достатньо задати координати трьох точок: $(\varepsilon_{\text{ср.min}}; k_{\text{гр.1}})$, $(\varepsilon_{\text{ср.н}}; k_{\text{н}})$ і $(\varepsilon_{\text{ср.max}}; k_{гр.2})$. Значення $k_{\text{гр.1}} = 1,0203$ і $k_{\text{гр.2}} = 1,1522$ можна визначити графічно, наприклад, з рис. 3. Вони залежать від $\varepsilon_{\text{ср.min}}$ та $\varepsilon_{\text{ср.max}}$, які, своєю чергою, є апріорною інформацією про об'єкт температурного контролю.

Узагальнюючи наведені на рис. 2–3 результати досліджень, підкреслимо, що основним фактором, який впливає на методичну похибку, для енергетичної однокольорової, а також двокольорової компенсаційної пірометрії випромінювання є середній рівень випромінювальної здатності, а для спектрального відношення пірометрії випромінювання – коефіцієнт селективності. На відміну від енергетичної, для двокольорової компенсаційної термометрії вплив коефіцієнта селективності на методичну похибку, якщо $\varepsilon_{\text{ср.}} = \varepsilon_{\text{ср.н}}$, є меншим у 4,4–6,2 разу. Тому для ефективного застосування розглянутих методів пірометричних вимірювань на конкретному об'єкті, зокрема металевому сплаві, потрібна апріорна інформація про зміни його випромінювальних характеристик. Наприклад, для того, щоб під час безконтактної пірометрії випромінювання залізовуглецевих сплавів у оптимальних зонах візування методичні похибки ДКПВ за модулем не перевищували 1,0 % та 0,5 %, необхідно забезпечити максимальні відхилення середнього рівня випромінювальної здатності від настроювального не більше ніж на ±0,042 та ±0,020, відповідно. В цих умовах, за рахунок нестабільності коефіцієнта селективності, похибки пірометрії спектрального відношення можуть досягати 3,01 %.

Висновки

Отже, в результаті досліджень комплексного впливу випромінювальної здатності металевих сплавів і селективності її спектрального розподілу на методичні похибки оптичної термометрії визначено переваги двокольорової компенсаційної пірометрії випромінювання для безконтактного термоконтролю металевих сплавів, вкритих прозорими та напівпрозорими оксидними плівками. На відміну від класичної термометрії, методичні похибки двокольорової компенсаційної пірометрії випромінювання практично не залежать від селективності випромінювання об'єктів, що термометруються, зокрема металевих сплавів. За умов, характерних для металургійного виробництва, наприклад, під час безконтактного вимірювання температури залізовуглецевих розплавів, зокрема чавунів та сталей, у струмені чи потоці, на випусканні чи зливанні з металургійних печей та агрегатів, під комплексним впливом випромінювальної здатності та селективності її спектрального розподілу методичні похибки двокольорової компенсаційної пірометрії випромінювання менші від похибок класичної інфрачервоної енергетичної пірометрії випромінювання, а також термометрії спектрального відношення відповідно в 1,04–1,26 та 1,21–1,57 разу.

Список літератури

[1] Л. Ф. Жуков, и Д. А. Петренко, "Влияние селективности теплового излучения металлических сплавов на методические погрешности их классической и двухцветовой компенсационной термометрии", *Промышленная теплотехника*, т. 39, № 1, с. 79–83, 2017.

[2] Z. Zhang, B. Tsai, and G. Machin, *Radiometric temperature measurements. II Applications*. Burlington, USA: Academic Press, 2010.

[3] В. Н. Сноπко, *Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения*. Минск, Беларусь: Институт физики им. Б. И. Степанова НАНБ, 1999.

[4] Н. Є. Гоц, Л. А. Назаренко, та М. М. Микийчук, "Розвиток багатоканальної термометрії за випроміненням для реалізації багатосмугових та тестових методів вимірювання температури", *Український метрологічний журнал*, № 4, с. 64–67, 2016.

[5] W. F. Gale, and T. C. Totemeier, *Smithells Metals Reference Book (8-th edition)*. Burlington, USA: Butterworth-Heinemann, 2004.

References

[1] L. F. Zhukov, and D. A. Petrenko, "Selectivity influence of heat radiation of metal alloys on methodical errors of their classical and two-colour compensative thermometry", *Industrial heat engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 79–83, 2017. (in Russian).

[2] Z. Zhang, B. Tsai, and G. Machin, *Radiometric temperature measurements. II Applications*. Burlington, USA: Academic Press, 2010.

[3] V. N. Snopko, *The bases of pyrometry methods with the use of spectrum of heat radiation*. Minsk, Belarus: Institute of physics named after B. I. Stepanov NASB, 1999 (in Russian).

[4] N. Gots, L. Nazarenko, and M. Mykyichuk. "Development of multichannel thermometry for radiation for implementation of multiband and test methods for measuring temperature", *Ukrainian Metrological Journal*, no. 4, pp. 64–67, 2016 (in Ukrainian).

[5] W. F. Gale, and T. C. Totemeier, *Smithells Metals Reference Book (8-th edition)*. Burlington, USA: Butterworth-Heinemann, 2004.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua