

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

Корнієнко Андрій Леонідович



УДК 536.521.3

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ БАГАТОКОЛЬОРОВОЇ СИМЕТРИЧНО-ХВИЛЬОВОЇ ТЕР-
МОМЕТРІЇ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ**

05.11.04 - прилади та методи вимірювання теплових величин

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ-2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Фізико-технологічному інституті металів і сплавів Національної академії наук України, м. Київ

Науковий керівник - доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
Жуков Леонід Федорович,
Фізико-технологічний інститут металів і
сплавів НАН України, завідувач відділу
термометрії та фізико-хімічних досліджень.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
Грищенко Тетяна Георгіївна,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
провідний науковий співробітник відділу теплометрії,
діагностики і оптимізації в енергетиці;

кандидат технічних наук,
Зайцева Олена Олександрівна
"Всеукраїнський державний науково-виробничий центр
стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав
споживачів" (ДП "Укрметртестстандарт") Мінекономіки
України, заступник начальника науково-виробничого відділу.

Захист відбудеться «____» _____ 2015 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.224.02 Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

Автореферат розісланий «____» _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 26.224.02,
кандидат технічних наук



Г.Г. Гелетука

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Більшість технологічних процесів у металургії засновані на тепловому впливі на основні і допоміжні матеріали. При цьому найбільш ресурсоємні етапи виготовлення відливок пов'язані з отриманням, обробкою та розливанням рідкого металу. Висока, до 70%, ресурсоємність визначається як природою цих процесів, так і наявністю технічно невиправданих витрат, внаслідок відхилень за основним технологічним параметром - температурою. Через недосконалість термоконтролю збільшується брак металопродукції, енерговитрати в 1,5 - 2,0 рази перевищують розрахункові, можливі аварійні ситуації, виявляється зниженим реальний ресурс футерування. Тому термоконтроль в структурі метрологічного забезпечення передових підприємств займає близько 30% від усіх засобів вимірювальної техніки.

Оптична термометрія безальтернативна в більшості випадків найбільш ефективного для оптимального керування металургійними процесами безперервного термоконтролю. Тому перші оптичні термометри створювалися і впроваджувалися в металургію практично одночасно з розробкою теорії теплового випромінювання.

Класична енергетична і спектрального відношення пірометрія випромінювання по інструментальним похибкам не поступається термоелектричній термометрії і широко використовується для еталонних вимірювань температури, в тому числі для побудови термодинамічної та практичної температурних шкал для температур, що знаходяться вище «золотої точки». Вона використовується, без введення температурних поправок, у разі чорного тіла для енергетичної та чорного і сірого тіл для двокольорової пірометрії випромінювання або з використанням поправок - у разі будь-яких забарвлених тіл зі стабільними оптичними характеристиками. Значить, зі збільшенням кількості робочих хвиль можливості оптичної термометрії розширюються. Тому останнім часом дослідження були переорієнтовані на багатокольорові технології, що забезпечують значне підвищення метрологічних характеристик оптичної термометрії в металургійних умовах невідомих оптичних характеристик металевих сплавів і тих, що змінюються випадково. Найбільш суттєві результати отримані провідними вченими України (Л. Ф. Жуков, ФТІМС НАНУ), Росії (Д. Я. Свет, ОІВТ РАН), Японії (М. Hashimoto, Noritake Co., Ltd.), Німеччини (U. Kienitz, "Erich Weinert" betrieb des kombinates), США (L. D. Cassady, Princeton University) та Білорусі (В. Н. Снопко, ОТКЗІФ ім. Б. І. Степанова НАНБ).

Таким чином, створення наукових основ, методів і засобів багатокольорової симетрично-хвильової пірометрії випромінювання (СХПВ), що підвищує метрологічні характеристики і розширює сферу застосування у металургії безальтернативного і найбільш ефективного для управління безперервного безконтактного і світловодного термоконтролю є актуальним і вирішує важливу науково-технічну задачу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота підготовлена і виконана у відділі термометрії та фізико-хімічних досліджень Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України. Основу роботи складають результати теоретичних і практичних досліджень та розробок проведених автором в рамках бюджетних відомчих тем: № III.38.08. 574 «Розробити теоретичні основи, методи і засоби багатокольорової світловодної і безконтактної

термометрії металевих сплавів» (2008 - 2011 рр.); № III.16.15.659 «Розробити фізичні основи, методи і засоби симетрично-хвильової пірометрії випромінювання металевих сплавів» (2015 - 2017 рр.) і контрактів № 376 від 29.10.2010 р. і № 523 від 28.10.2013 р.

Мета і задачі дослідження.

Мета дослідження - підвищення метрологічних характеристик і розширення області ефективного застосування багатокольорової високотемпературної пірометрії випромінювання для безконтактного і світловодного термоконтролю металевих сплавів. Основна наукова ідея роботи полягає у використанні зв'язку їх випромінювальної здатності на середній довжині хвилі з випромінювальними здатностями на симетрично розташованих по спектру граничними довжинами хвиль.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити місце і значення термоконтролю в метрологічному забезпеченні металургії;
- класифікувати технології багатокольорової пірометрії випромінювання;
- визначити недоліки відомих рішень багатокольорової термометрії;
- дослідити вплив оптичних характеристик багатокольорової термометрії (ширини спектрального діапазону і довжини середньої хвилі), а також металевих сплавів (коефіцієнтів нелінійності і крутизни та випромінювальної здатності) на методичні похибки лінійної симетрично-хвильової термометрії;
- дослідити інструментальні похибки багатокольорової симетрично-хвильової термометрії металевих сплавів;
- розробити математичні моделі і методи лінійної та універсальної багатокольорової симетрично-хвильової термометрії металевих сплавів в умовах невідомих випромінювальних характеристик і тих, що змінюються випадково;
- розробити багатокольорову пірометричну систему, що забезпечує вимірювання однокольорових температур випромінювання на робочих довжинах хвиль і обробку первинної інформації за алгоритмами лінійної та універсальної симетрично-хвильової пірометрії випромінювання;
- розробити методики і установки, що їх реалізують, для експериментальних досліджень метрологічних характеристик симетрично-хвильової термометрії металевих сплавів;
- експериментально дослідити і підтвердити більш високі, порівняно з відомими рішеннями, метрологічні характеристики багатокольорової симетрично-хвильової пірометрії випромінювання, що розширюють застосування безперервного безконтактного і світловодного контролю температури в металургії.

Об'єкт дослідження.

Безперервне вимірювання температури металевих розплавів в процесах їх отримання, обробки і розливання.

Предмет дослідження.

Багатокольорові симетрично-хвильові методи і система для безперервного вимірювання температури металевих розплавів.

Методи дослідження.

Методи математичного та спектрального аналізу, а також обчислювального експерименту з використанням ПК та відповідного програмного забезпечення, тер-

модинамічних законів теплового випромінювання, пірометричних рівнянь і теплофізичних моделей із врахуванням методичних та інструментальних похибок лінійної та універсальної симетрично-хвильової пірометрії випромінювання.

Методами прикладної метрології, в тому числі теорії похибок і порівняльних вимірювань виконані експериментальні дослідження впливу похибок вимірювань одноколових температур випромінювання металевих сплавів на інструментальні похибки багатокольорової симетрично-хвильової пірометрії випромінювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна задача розробки теоретичних і метрологічних основ багатокольорової симетрично-хвильової пірометрії випромінювання, що для високотемпературного діапазону підвищує метрологічні характеристики і розширює сферу застосування безперервного безконтактного і світловодного термоконтролю металевих сплавів в умовах випромінювальних характеристик, які змінюються випадково. При цьому отримано такі нові наукові результати.

1. Вперше, в результаті вивчення та класифікації технологій багатокольорової термометрії, сформульована і обґрунтована система теплофізичних моделей для розрахунку температури об'єктів з лінійними і нелінійними розподілами випромінювальної здатності, по температурах їх випромінювання і запропонованим критерієм відповідності, яка заснована на взаємозв'язках випромінювальної здатності на середній і симетрично розташованих по спектру граничних довжинах хвиль.

2. Вперше встановлено закономірності впливу оптичних характеристик багатокольорової термометрії і металевих сплавів на методичні похибки симетрично-хвильової пірометрії випромінювання, використання яких підвищує метрологічні характеристики безперервного безконтактного і світловодного термоконтролю. Визначено джерела, а також способи зменшення та виключення методичних похибок багатокольорової симетрично-хвильової пірометрії випромінювання.

3. Вперше досліджено закономірності впливу похибок вимірювання одноколових температур випромінювання на інструментальні похибки багатокольорової с-хвильової термометрії та розроблені рекомендації щодо їх зменшення.

4. Вперше запропоновані та обґрунтовані алгоритми та методи багатокольорової лінійної та універсальної симетрично-хвильової пірометрії випромінювання металевих сплавів. Перший метод виключає методичні похибки при будь-яких лінійних розподілах випромінювальної здатності і в решті випадків нелінійних розподілів випромінювальної здатності металевих сплавів має більш високі метрологічні характеристики в порівнянні з відомими рішеннями. Другий метод дозволяє виключити методичну складову з похибки вимірювань температури металевих сплавів з будь-якими спектральними розподілами випромінювальної здатності.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

- для технічної реалізації розроблених методів лінійної та універсальної симетрично-хвильової пірометрії випромінювання, на базі сучасних оптоелектронних, волоконно-оптичних, мікропроцесорних та комп'ютерних технологій, створена багатокольорова пірометрична система;

- розроблено методичне забезпечення та комплекс технічних засобів для градування та експериментальної перевірки метрологічних характеристик систем багатокольорової симетрично-хвильової термометрії металевих розплавів;

- використання симетрично-хвильових технологій у складі розробленого та впроваджуємого ФТІМС НАН України найбільш ефективного безперервного безконтактного і світловодного термоконтролю металевих розплавів в процесах їх отримання, обробки і розливання дозволяє в кілька разів підвищити метрологічні характеристики і розширити сферу застосування такого контролю на підприємствах металургії та ливарних виробництвах;

- безперервний термоконтроль металевих розплавів, наприклад, в індукційних плавильних міксерних і розливних печах дозволяє знизити енергозатрати, брак «по температурі», угар шихтових матеріалів, а також підвищити термін служби футерування, продуктивність печей і виключити аварії пов'язані з надмірним нагріванням або охолодженням металу;

- розроблені технології були передані у складі систем безперервного світловодного та безконтактного температурного контролю до DOSIC (КНР).

Особистий внесок здобувача.

Постановка завдань досліджень виконана разом з науковим керівником. Теоретичні дослідження метрологічних характеристик багатокольорової симетрично-хвильової пірометрії випромінювання, а також розробка математичних моделей лінійного і універсального методів, їх алгоритмів, програмного забезпечення та багатокольорової пірометричної системи виконані автором за участю наукового керівника. Виготовлення, складання та налагоджування багатокольорової пірометричної системи та експериментальних установок виконані у співавторстві з провідними фахівцями відділу термометрії та фізико-хімічних досліджень ФТІМС НАН України, але внесок здобувача є визначальним. Розробка методик та експериментальні дослідження метрологічних характеристик багатокольорової симетрично-хвильової термометричної технології виконані автором самостійно.

В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі результати:

[1] – теоретичні та експериментальні дослідження багатокольорової лінійної симетрично-хвильової термометрії за розробленими математичними моделями та алгоритмами, розрахунок похибок та порівняльний аналіз метрологічних характеристик; [2, 3] - обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень; [4] - експериментальні дослідження характеристик термоелектричного змінного перетворювача; [5, 7] - багатокольорова симетрично-хвильова технологія; [6] - історія і стан багатокольорової термометрії; [8] - математична модель багатокольорової лінійної симетрично-хвильової термометрії та порівняльний аналіз метрологічних характеристик; [9 - 13] - розрахунок методичних та інструментальних похибок і порівняння їх з результатами класичної та відомої багатокольорової пірометрії випромінювання; [14, 15] - розробка алгоритмів і математичних моделей лінійної та універсальної симетрично-хвильової термометрії; [16] - експериментальні дослідження та статистична обробка результатів вимірювань.

Апробація результатів дисертації.

Викладені в дисертаційній роботі наукові положення і результати доповідалися на 13 науково-технічних конференціях, симпозіумах і семінарах, у тому числі 11 міжнародних і 2 всеукраїнських, а саме:

II міжнародна конференція «Проблемы промышленной теплотехники», 2001, Київ; міжнародний науково-технічний конгрес «Пути возрождения литейного производства в Украине в начале нового тысячелетия», 2001, Київ; міжнародний науково-технічний конгрес «Литейное производство в новом веке – как победить в конкуренции», 2002, Київ; III міжнародна науково-технічна конференція «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве», 2011, Краматорськ; I і II міжнародні науково-практичні конференції «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование экономика и экология», 2011, 2012, Київ; промислово-інвестиційний форум «Инвестиции, индустрия, инновации», 2012, Запоріжжя; IX міжнародна науково-технічна конференція «Методи і засоби вимірювань фізичних величин» - «Температура-2012», 2012, Львів; Конференція молодих вчених ФТІМС НАНУ, 2012, Київ; IX і X міжнародні науково-практичні конференції «Литье 2013, 2014», 2013, 2014, Запоріжжя; II і III міжнародні науково-практичні конференції «Металлургия 2013, 2014», 2013, 2014, Запоріжжя.

Публікації.

Всього за темою дисертації опубліковано 27 наукових праць, у тому числі 1 монографія (у співавторстві), 15 статей у фахових наукових виданнях України, 1 стаття у фаховому науковому зарубіжному виданні, 5 у збірниках матеріалів і тез науково-технічних конференцій, 6 патентів України.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів з підсумками, загальних висновків, списку використаних джерел із 116 найменувань, та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 150 сторінок, 27 рисунків і 20 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі сформульовані основні положення і описано стан наукової проблеми, що розглядаються у дисертаційній роботі. Обґрунтовано актуальність теми; показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульована мета і завдання досліджень; визначено об'єкт, предмет та методи досліджень, наукова новизна і практичне значення отриманих результатів; представлені особистий внесок здобувача, апробація результатів, публікації та структура дисертації.

У першому розділі наведено аналітичний огляд, класифікація та аналіз недоліків сучасних методів багатокольорової термометрії, а також встановлено, що:

- вимірювання температури домінують і досягають 30% в структурі метрологічного забезпечення металургійних виробництв. Оптична термометрія найбільш прийнятна для найефективнішого безперервного термоконтролю металургійних процесів, у тому числі найбільш складних у контролі та автоматизації високотемпературних процесів отримання, обробки та розливання рідкого металу;

- ливарні та механічні властивості металу, експлуатаційні характеристики і ресурсоемність відливок істотно залежать від температурних режимів зазначених процесів;

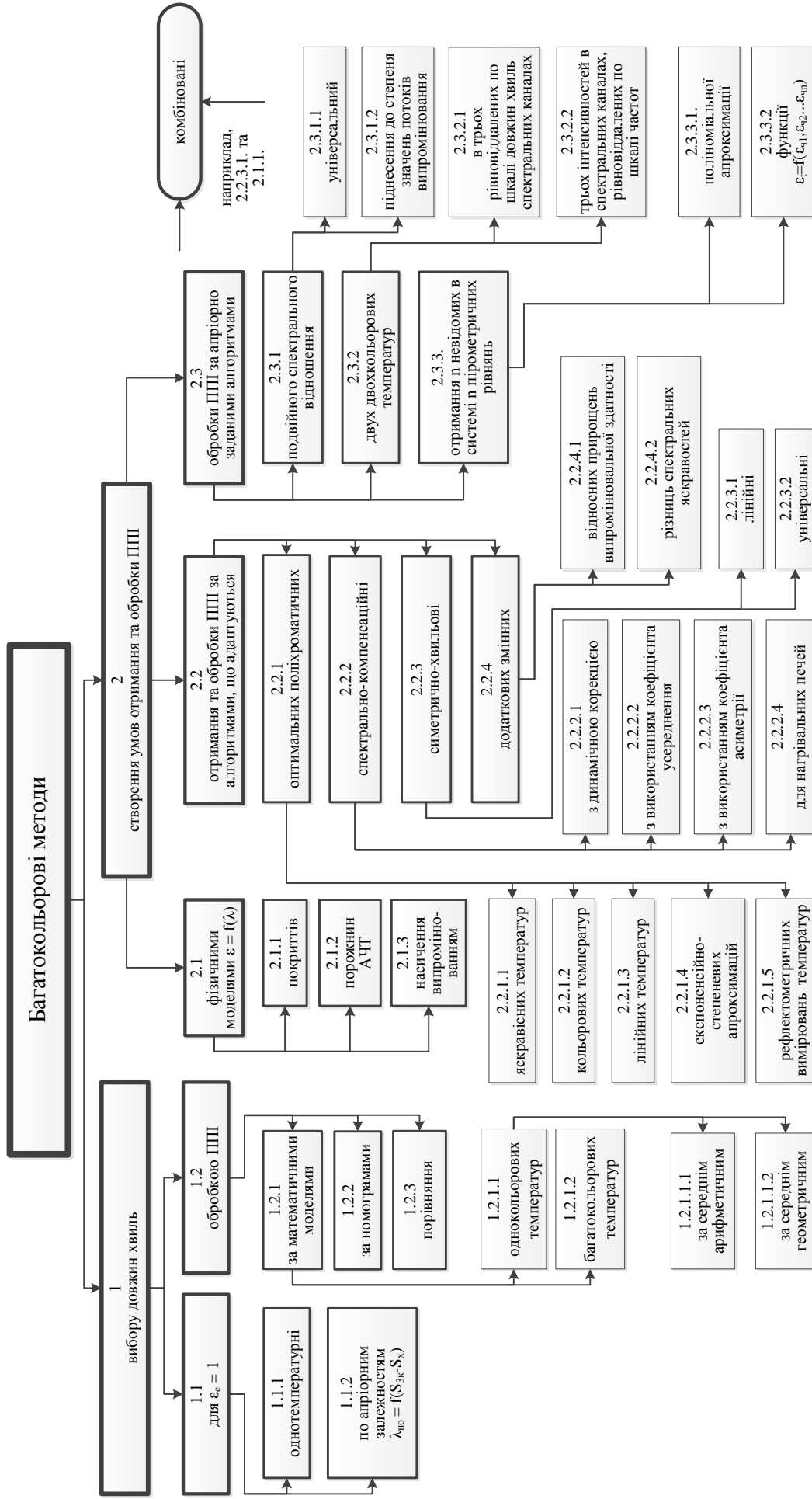


Рис. 1. Класифікація методів багатокольорової термометрії.

- використання класичної енергетичної та спектрального відношення термометрії обмежується відповідно умовами термодинамічно-рівноважного і сірого випромінювання без калібрування і забарвленого випромінювання з використанням температурних поправок у разі стабільних випромінювальних характеристик контрольованої поверхні і пропускання проміжного середовища. При характерних для металургійних об'єктів випадкових змінах зазначених оптичних характеристик найбільш прийнятною є багатокольорова пірометрія випромінювання, яка у порівнянні з класичною, знижує методичні похибки в кілька разів.

Аналіз стану багатокольорової термометрії показує, що:

- основні розробки в області багатокольорової пірометрії випромінювання виконано в останні 10 років;
- сучасні досягнення і мініатюризація оптоелектронної, волоконної, мікропроцесорної та комп'ютерної техніки сприяють бурхливому розвитку цього напрямку в оптичній термометрії;
- найбільш суттєві результати в багатокольоровій термометрії отримані вітчизняними вченими, а також у США, Японії, Німеччині, Росії та Білорусі.

Для систематизації та визначення напрямків розвитку відомих рішень, а також місця розробленої автором симетрично-хвильової пірометрії випромінювання в системі багатокольорових технологій виконана їх класифікація (рис. 1). В результаті класифікації встановлено, що всі методи можна розділити на дві великі групи і відповідні їм 43 підгрупи.

В результаті аналізу та класифікації розроблені вимоги до багатокольорових термометричних технологій, для виконання яких наведено перелік поставлених завдань.

Другий розділ присвячено дослідженням впливу оптичних характеристик багатокольорової пірометрії випромінювання і металевих сплавів на методичні та інструментальні похибки лінійної симетрично-хвильової термометрії. В результаті аналізу оптичних характеристик металевих сплавів у виробничих умовах класифіковані спектральні розподіли їх випромінювальної здатності за якісними і кількісними характеристиками.

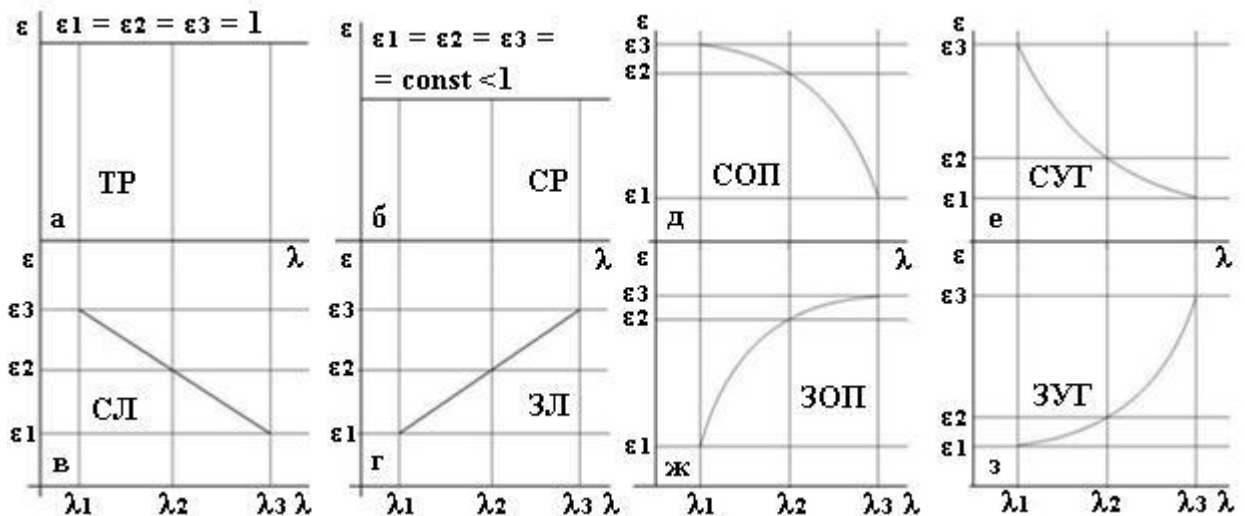


Рис. 2. Графіки спектральних розподілів випромінювальної здатності.

Для конденсованих середовищ, в тому числі і металевих сплавів, в умовах світлової, а також безконтактної термометрії, спектральні розподіли випромінювальної здатності у видимій та ближній інфрачервоній областях спектра є монотонними і відповідно можуть бути термодинамічно-рівноважними (ТР), сірими (СР) і забарвленими, в тому числі лінійними (СЛ, ЗЛ) або нелінійними (СОП, СУГ, ЗОП, ЗУГ) (таблиця 2.1).

Класифікація оптичних характеристик об'єктів, що термометруються. Таблиця 1.

Оптичні характеристики об'єктів, що термометруються						
об'єкти	Якісні			кількісні		Дільник $D = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) / \varepsilon_2$
	спектральні розподіли $\varepsilon = f(\lambda)$	математичні вирази розподілів	позначення розподілів	K_H	K_K, M^{-1}	
	монотонні лінійні					
абсолютно чорні	1 термодинамічно-рівноважні	$\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2} = \varepsilon_{\lambda_3} = 1$	ТР	0	0	2
сірі	2 сірі	$\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2} = \varepsilon_{\lambda_3} = \text{const} < 1$	СР	0	0	2
забарвлені	3 спадаючі лінійні	$1 \geq \varepsilon_{\lambda_1} > \varepsilon_{\lambda_2} > \varepsilon_{\lambda_3}$	СЛ	0	> 0	2
	4 зростаючі лінійні	$\varepsilon_{\lambda_1} < \varepsilon_{\lambda_2} < \varepsilon_{\lambda_3} \leq 1$	ЗЛ	0	$0 >$	2
	монотонні нелінійні					
	1 спадаючі опуклі	$1 \geq \varepsilon_{\lambda_1} > \varepsilon_{\lambda_2} > \varepsilon_{\lambda_3}$	СОП	$0 >$	> 0	$D < 2$
	2 спадаючі увігнуті	$1 \geq \varepsilon_{\lambda_1} > \varepsilon_{\lambda_2} > \varepsilon_{\lambda_3}$	СУГ	$0 >$	> 0	$D > 2$
	3 зростаючі опуклі	$\varepsilon_{\lambda_1} < \varepsilon_{\lambda_2} < \varepsilon_{\lambda_3} \leq 1$	ЗОП	> 0	$0 >$	$D < 2$
	4 зростаючі увігнуті	$\varepsilon_{\lambda_1} < \varepsilon_{\lambda_2} < \varepsilon_{\lambda_3} \leq 1$	ЗУГ	> 0	> 0	$D > 2$

В умовах безконтактної термометрії спектральні розподіли чистого і покритого оксидними плівками металевого розплаву, із збільшенням їх товщини, можуть бути відповідно спадаючими «металевими», сірими або зростаючими «неметалевими». Істотний вплив на характер розподілів має також кількість неметалічних включень. Відповідно до класифікації запропоновані назви та математичні описи розподілів, а також їх кількісні характеристики, які визначаються коефіцієнтами їх нелінійності і крутизни, а також рівнем випромінювальної здатності:

$$K_H = \varepsilon_2 - \varepsilon_{2л}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{2л}$ - випромінювальна здатність об'єкта на довжині хвилі λ_2 для лінійно апроксимованого розподілу $\varepsilon_{л} = f(\lambda)$,

$$K_K = (\varepsilon_3 - \varepsilon_1) / (\lambda_3 - \lambda_1). \quad (2)$$

Симетрично-хвильова пірометрія випромінювання заснована на залежності випромінювальної здатності ε_2 на середній хвилі λ_2 від її значень ε_1 і ε_3 на граничних рівновіддалених хвилях λ_1 і λ_3 . У разі лінійних розподілів випромінювальної здатності

$$\varepsilon_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) / 2. \quad (3)$$

Взаємозв'язки температури випромінюючої поверхні металу T з його температурами випромінювання S_1 , S_2 і S_3 на λ_1 , λ_2 і λ_3 визначаються системою трьох пірометричних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{1}{T} - \frac{1}{S_1} = \frac{\lambda_1}{c_2} \ln \varepsilon_1 ; \\ \frac{1}{T} - \frac{1}{S_2} = \frac{\lambda_2}{c_2} \ln \varepsilon_2 ; \\ \frac{1}{T} - \frac{1}{S_3} = \frac{\lambda_3}{c_2} \ln \varepsilon_3, \end{cases} \quad (4)$$

де $c_2 = h \cdot c / k$ - друга постійна Планка, К·м.

З першого і третього рівнянь системи знаходимо вирази для ε_1 і ε_3 , після підстановки в (3) отримуємо вираз, який використовуємо в другому рівнянні системи і виводимо узагальнююче пірометричне рівняння (математичну модель) для розрахунку температури об'єктів з лінійними розподілами випромінювальної здатності по вимірним температурам їх випромінювання S_1 , S_2 і S_3

$$\frac{\lambda_2}{c_2} \ln \frac{e^{\frac{c_2(T-S_1)}{T\lambda_1 S_1}} + e^{\frac{c_2(T-S_3)}{T\lambda_3 S_3}}}{2} - \frac{1}{T} + \frac{1}{S_2} = 0. \quad (5)$$

Рівняння (5) відносно T аналітично не вирішується, а визначається чисельними методами за допомогою ПК.

Дослідження метрологічних характеристик виконані за допомогою отриманої математичної моделі у видимій та ближній інфрачервоній областях спектру в робочому спектральному діапазоні найперспективніших і поширених кремнієвих детекторів випромінювання. В якості базового об'єкта термометрії використаний вольфрам з СОП-розподілом випромінювальної здатності. Вольфрам, з детально вивченими спектральними розподілами випромінювальної здатності, найбільш представницький за оптичними характеристиками для найпоширеніших в металургії залізобутелевих сплавів і використовується в термометрії для порівняльних оцінок метрологічних характеристик. Для досліджень, відповідно до класифікації (таблиця 1), були також використані апроксимовані (а) і дзеркальні (з) (СОПав, СУГазw, ЗОПазw, ЗУГазw) розподіли випромінювальної здатності вольфраму (w), що апроксимовані наступними поліномами шостого ступеня:

$$\varepsilon_{\text{СОПав}} = 0,0906\lambda_n^6 + 0,6024\lambda_n^5 - 1,6045\lambda_n^4 + 2,2555\lambda_n^3 - 1,8327\lambda_n^2 + 0,6475\lambda_n - 0,4234;$$

$$\varepsilon_{\text{ЗОПазw}} = -0,0906\lambda_n^6 + 0,6024\lambda_n^5 - 1,6045\lambda_n^4 + 2,2555\lambda_n^3 - 1,8327\lambda_n^2 + 0,6475\lambda_n + 0,4015;$$

$$\varepsilon_{\text{ЗУГазw}} = 0,091\lambda_n^6 - 0,2693\lambda_n^5 + 0,2682\lambda_n^4 - 0,0177\lambda_n^3 - 0,1144\lambda_n^2 - 0,1443\lambda_n + 0,5593;$$

$$\varepsilon_{\text{СУГазw}} = -0,091\lambda_n^6 + 0,2693\lambda_n^5 - 0,2682\lambda_n^4 + 0,0177\lambda_n^3 + 0,1144\lambda_n^2 + 0,1443\lambda_n + 0,2656.$$

Результатами досліджень впливу ширини спектрального діапазону $\Delta\lambda$ доведено, що при збільшенні великих ($\Delta\lambda > 0,3$ мкм) і зменшенні малих ($\Delta\lambda < 0,1$ мкм) значень ширини спектрального діапазону похибки симетрично-хвильової термометрії знижуються за рахунок підвищення ефективної лінійності базових експериментальних спектральних розподілів випромінювальної здатності. При цьому, для середніх значень ширини спектрального діапазону від 0,1 до 0,3 мкм має місце пов'язане з підвищенням ефективної нелінійності аномальне зростання похибок. У випадку більш інформативних апроксимованих розподілів ця, пов'язана з експериментальною нелінійністю аномалія відсутня. Однак для великих і малих значень ширини спектрального діапазону залежності похибок на експериментальних і апроксимованих розподілах збігаються кількісно для вольфраму і якісно - для його дзеркальних розподілів. При будь-якій ширині спектрального діапазону домінуючий вплив на похибки на-

дають якісні характеристики спектральних розподілів випромінювальної здатності. Примітно те, що мінімальні похибки мають місце на характерних для неокисленої поверхні вольфраму і залізовуглецевих сплавів СОП-розподілах. Причому, вони рівні або в 1,8 - 2,2 рази менше похибок для дзеркальних спектральних розподілів випромінювальної здатності і вибором відповідних значень $\Delta\lambda$ теоретично можуть бути зменшені до нуля.

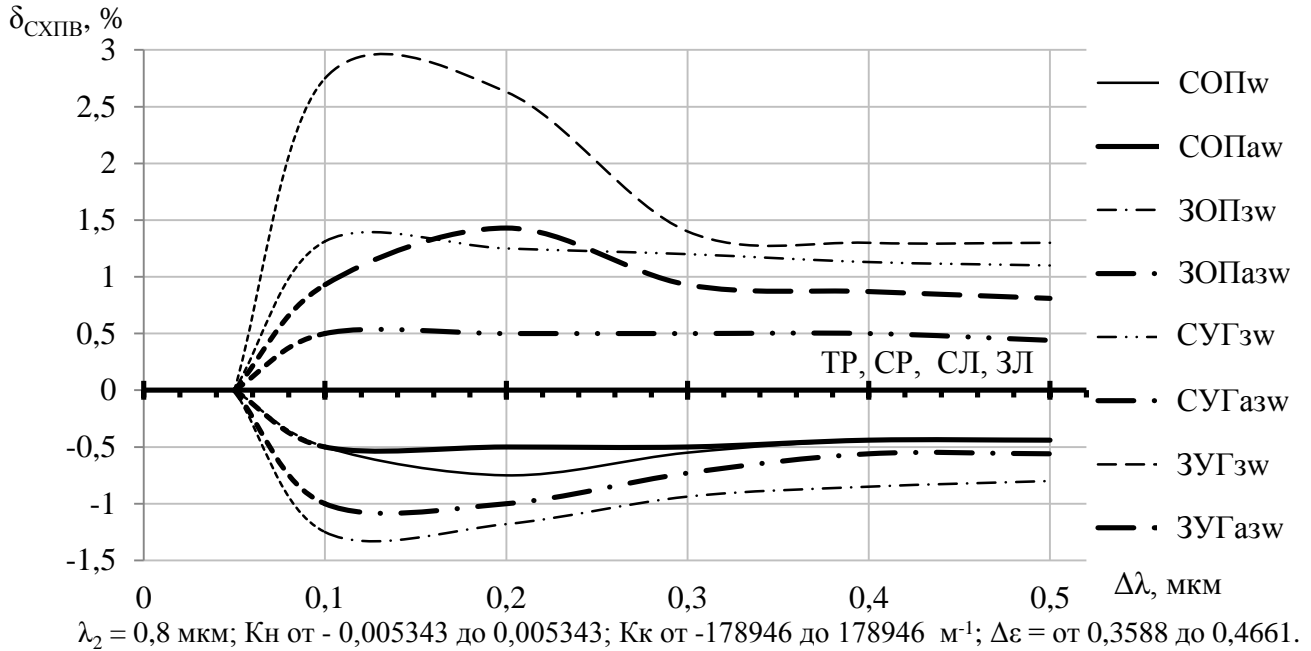


Рис. 3. Залежності похибок лінійної СХПВ від значень ширини спектрального діапазону $\Delta\lambda$.

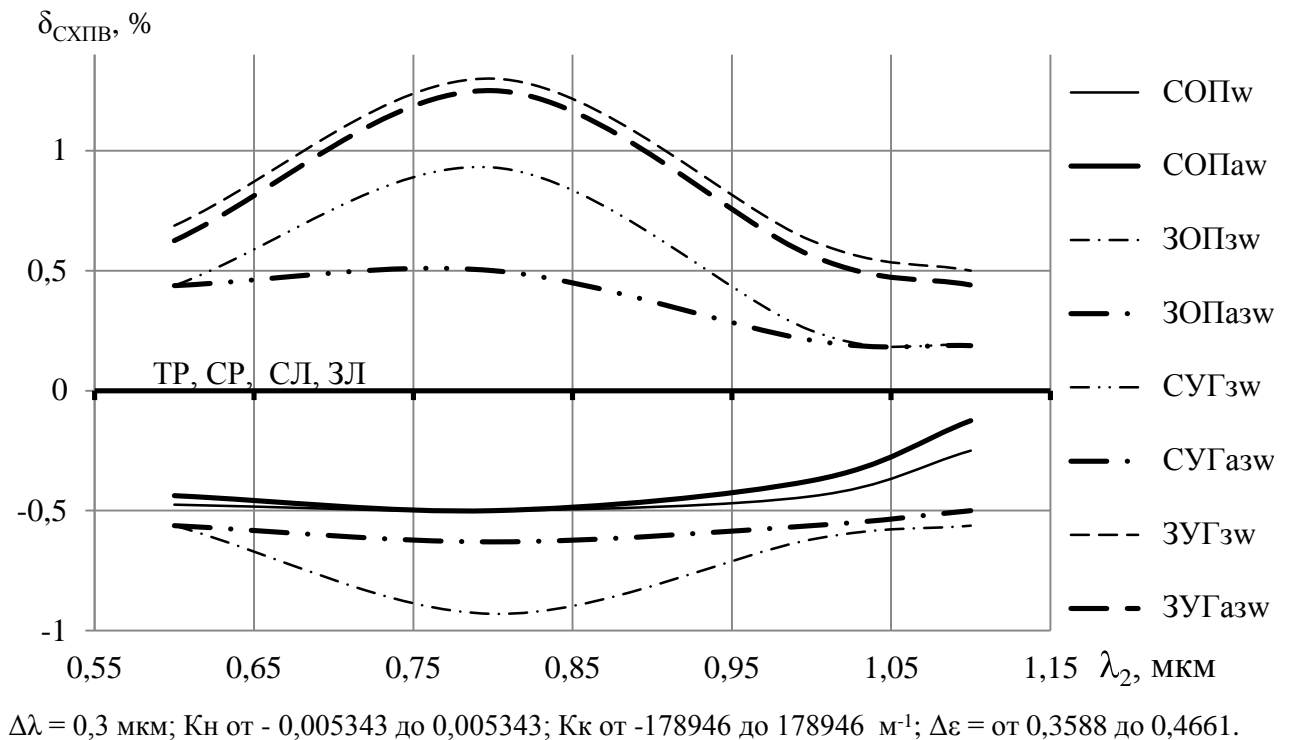


Рис. 4. Залежності похибок лінійної СХПВ від довжини середньої хвилі λ_2 .

Для забарвлених об'єктів, що термометруються з СОП-, СУГ-, ЗОП- і ЗУГ-розподілами залежності похибок від λ_2 мають екстремальний характер. Екстремум знаходиться на довжині хвилі $\lambda_2 = 0,8$ мкм і з переходом в інфрачервону область спектра ($\lambda_2 = 1,1$ мкм) похибки зменшуються в 1,1 - 4,8, у тому числі для СОПав-розподілу в 2,0 - 4,5 рази. При зменшенні λ_2 від 0,8 до 0,6 мкм похибки для всіх розподілів зменшуються в 1,1 - 2,1, у тому числі для СОПав-розподілу 1,1 - 1,3 рази. При зміщенні λ_2 в інфрачервону і видиму області спектра похибки зменшуються за рахунок підвищення лінійності спектральних розподілів ϵ відповідно в довгохвильовій і короткохвильовій частинах спектра. З цієї ж причини похибки для апроксимованих розподілів нижче, ніж для експериментальних. З зміною λ_2 в межах від 0,6 до 1,1 мкм при $\Delta\lambda = 0,3$ мкм похибки для експериментальних і апроксимованих СОП-, СУГ-, ЗОП- і ЗУГ-розподілів змінюються в діапазонах 0,13 - 0,50; 0,19 - 0,93; 0,50 - 0,93 і 0,44 - 1,30%.

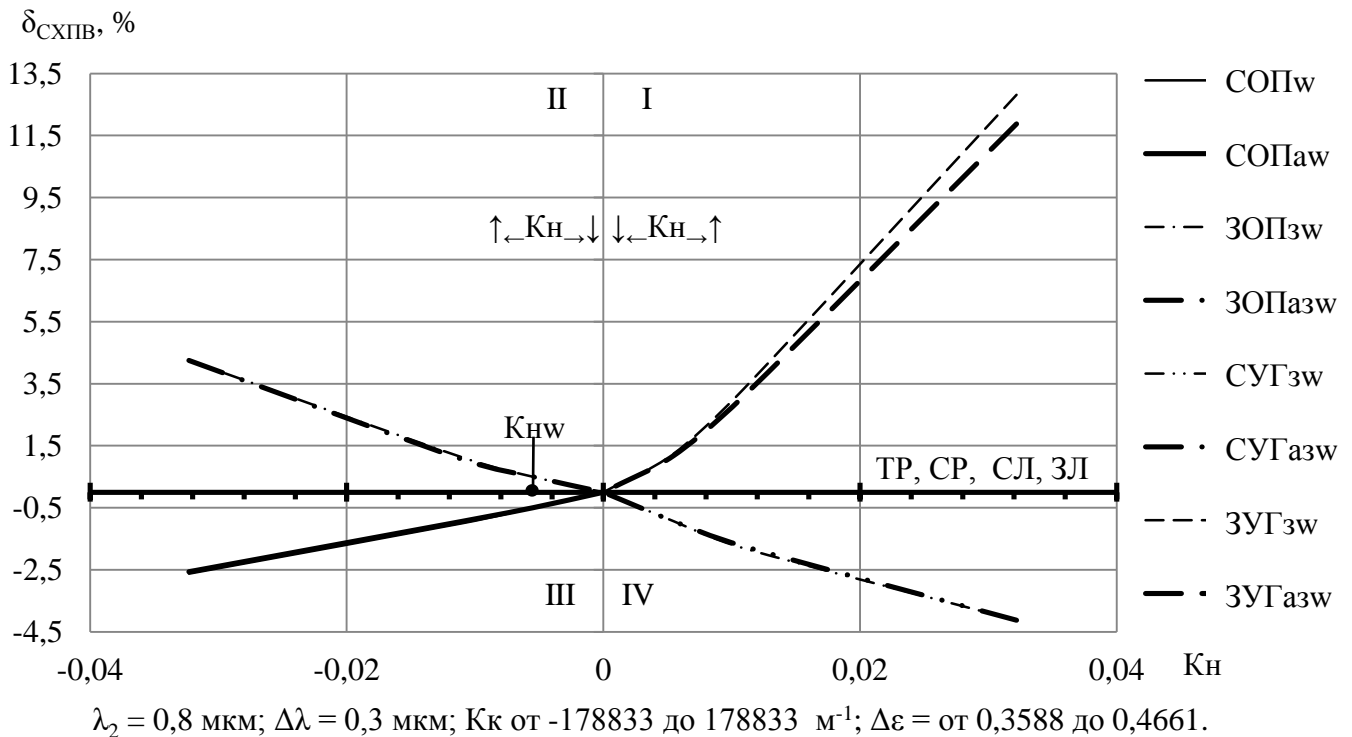


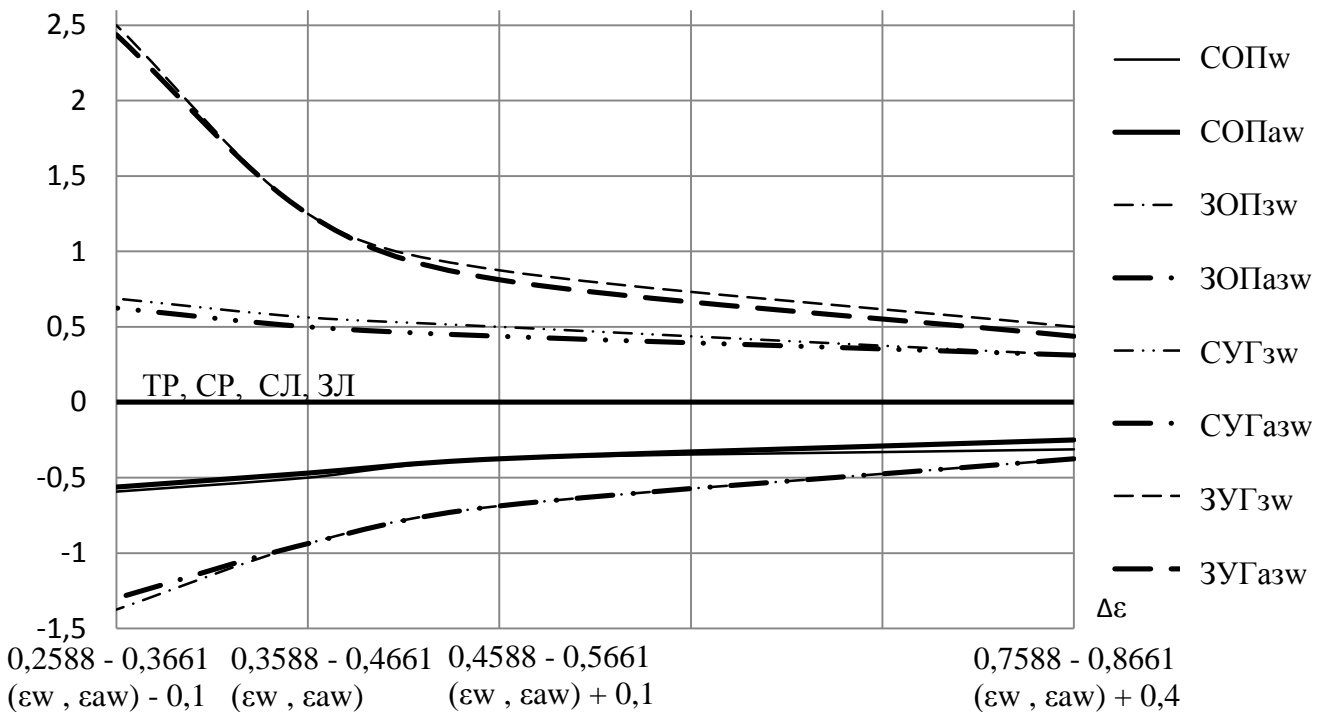
Рис. 5. Залежності похибок лінійної СХПВ від коефіцієнта не лінійності K_n .

Досліджено вплив нелінійності і крутизни спектральних розподілів випромінювальної здатності об'єктів, що термометруються а також їх абсолютних значень на методичні похибки. Встановлено, що характер і, пов'язана з ним, нелінійність спектральних розподілів випромінювальної здатності має домінуючий вплив на похибки. Зі зміною характеру від СОП - і СУГ- до ЗОП- і ЗУГ-розподілів, при реальному значенні $K_n = \pm 0,0055$, похибки зростають відповідно в 1,8 і 2,4 рази. Причому для СУГ-, ЗОП- і ЗУГ-розподілів із збільшенням коефіцієнта нелінійності в широкому діапазоні, що перебиває реальні значення 0,0055 - 0,032 похибки відповідно зростають в 1,6, 1,6 і 5,0 разів. При нелінійності експериментальних СОП-розподілів ($K_n = -0,0055$) похибки не перевищують 0,5%. При цьому зі збільшенням коефіцієнта нелінійності в досліджених більш широких межах від -0,0055 до -0,032 похибки зростають від 0,5 до 2,6% при неоптимальних значеннях $\Delta\lambda$ і λ_2 .

Прямий вплив коефіцієнта крутизни спектральних розподілів випромінювальної здатності відсутній. Однак при цьому встановлено непрямий вплив цієї характеристики через відносну лінійність і випромінювальну здатність, зустрічний вплив яких викликає незначні, до 0,14%, похибки.

Відповідно до термодинамічних законів теплового випромінювання і узагальнюючого пірометричного рівняння (5) залежності похибок від випромінювальної здатності мають монотонний експонентний спадаючий характер для всіх розподілів ϵ . Для СОП-розподілу з підвищенням випромінювальної здатності від 0,26 до 0,87 похибки зменшуються від 0,6 до 0,3% ($\lambda_1 = 0,5$; $\lambda_2 = 0,8$ і $\lambda_3 = 1,1$ мкм, $\Delta\lambda = 0,3$ мкм). В аналогічних умовах похибки лінійної симетрично-хвильової пірометрії в 9,1 - 25,0 і 5,9 - 6,8, а також 2,4 - 3,3 рази нижче похибок відповідно класичної енергетичної однокольорової та спектрального відношення двокольорової, а також відомої поліхроматичної пірометрії випромінювання.

$\delta_{\text{СХПВ}}, \%$



$\Delta\lambda = 0,3$ мкм; $\lambda_2 = 0,8$ мкм; K_n от - 0,005343 до 0,005343; K_k от -178833 до 178833 м^{-1}

Рис. 6. Залежності похибок лінійної СХПВ від випромінювальної здатності.

Похибки симетрично-хвильової термометрії об'єктів з лінійними розподілами ϵ дорівнюють нулю і не залежать від оптичних характеристик багатокольорової пірометрії випромінювання і об'єктів, що термометруються. Це визначає явні переваги СХПВ і розширює сферу застосування оптичної термометрії, порівняно з класичними, а також відомими багатокольоровими методами пірометрії випромінювання.

Похибки для СОП-розподілів не перевищують 0,5% і при оптимізації оптичних характеристик $\Delta\lambda$ і λ_2 зменшуються від 0,50 до 0,13%. Подальшим зменшенням $\Delta\lambda$ похибки, в принципі, можуть бути знижені до нуля.

Залежно від характеру розподілів ϵ похибки мають систематичний характер і різні знаки ($\delta_{\text{СОП}} < 0$ і $\delta_{\text{ЗОП}} < 0$; $\delta_{\text{СУГ}} > 0$; $\delta_{\text{ЗУГ}} > 0$). Це допускає усереднення результатів

порівняльних вимірювань температури об'єктів з більш значною і змінною нелінійністю спектральних розподілів випромінювальної здатності введенням температурних поправок.

Вплив похибок вимірювань вихідних однокольорових температур випромінювання на інструментальні похибки симетрично-хвильової термометрії δ_{IHC} для СОП-розподілів мінімальні і іноді близькі або, в основному, значно нижче однаково розподілених по знаках та рівних за величиною похибок вихідних вимірювань температур випромінювання $\delta_{S_1S_2S_3}$. Наприклад, при $\delta_{S_1S_2S_3}$ рівній 0,2; 0,5 і 1,0% δ_{IHC} відповідно становить -0,30; 0,00 і 0,49%, за рахунок компенсації методичними складовими. Для лінійних спадаючих розподілів δ_{IHC} при цих же $\delta_{S_1S_2S_3}$ відповідно дорівнює 0,20; 0,50 і 0,99%. Зі збільшенням похибок вимірювань вихідних однокольорових температур випромінювання інструментальні похибки симетрично-хвильової термометрії змінюються практично в лінійній пропорції. Причому, мінімальні інструментальні похибки мають місце для, необхідних і реальних в умовах металургії, рівних похибок вимірювань вихідних однокольорових температур випромінювання металевих сплавів.

Методичні та інструментальні похибки мінімальні у разі СОП- і зростають відповідно для СУГ-, ЗОП- і ЗУГ-розподілів, мають систематичну складову, що забезпечує її виключення і, підвищення точності вимірювань введенням температурних поправок.

У третьому розділі представлені методи і засоби симетрично-хвильової пірометрії випромінювання, розроблені з використанням встановлених закономірностей впливу оптичних характеристик металевих сплавів і багатокольорової симетрично-хвильової пірометрії випромінювання на її метрологічні характеристики.

Методи трьохкольорової лінійної та універсальної симетрично-хвильової термометрії засновані на залежностях випромінювальної здатності на середній хвилі від випромінювальної здатності на граничних хвилях (3, 7) і відповідних математичних моделях (5, 6). Перший метод дозволяє виключити методичні похибки для лінійних спадаючих, зростаючих, сірих і термодинамічно-рівноважних розподілів випромінювальної здатності об'єктів термометрії, у тому числі вкритих оксидними плівками металевих розплавів і іммерсійних світловодів. Похибки в цих випадках визначаються дискретністю перебору значень температури при чисельному рішенні узагальнюючого пірометричного рівняння (5).

Універсальний метод багатокольорової симетрично-хвильової термометрії заснований на математичній моделі

$$\frac{\lambda_2}{c_2} \ln \frac{e^{-\frac{c_2(T-S_1)}{T\lambda_1 S_1}} + e^{-\frac{c_2(T-S_3)}{T\lambda_3 S_3}}}{D} - \frac{1}{T} + \frac{1}{S_2} = 0. \quad (6)$$

При цьому, на відміну від лінійного методу, випромінювальна здатність на середній довжині хвилі λ_2 визначається відношенням суми значень випромінювальної здатності ϵ_1 і ϵ_3 на граничних довжинах хвиль λ_1 і λ_3 до дільника D

$$\epsilon_2 = (\epsilon_1 + \epsilon_3) / D. \quad (7)$$

Дискретність значень D задається з урахуванням вимог до точності вимірювань температури і перевіряється за критерієм відповідності КР. У порівнянні з відомими рішеннями метод дозволяє виключити домінуючу в оптичній термометрії

методичну складову з похибки вимірювань температури об'єктів з будь-якими спектральними розподілами випромінювальної здатності, що випадково змінюються. Наприклад, у випадку СОП-розподілу методична складова, що виключається дорівнює 0,5%.

Принцип дії багатокольорової пірометричної системи заснований на вимірюваннях однокольорових температур випромінювання об'єктів, що термометруються на робочих хвилях з подальшою обробкою первинної пірометричної інформації за алгоритмами багатокольорової лінійної або універсальної симетрично-хвильової пірометрії випромінювання.

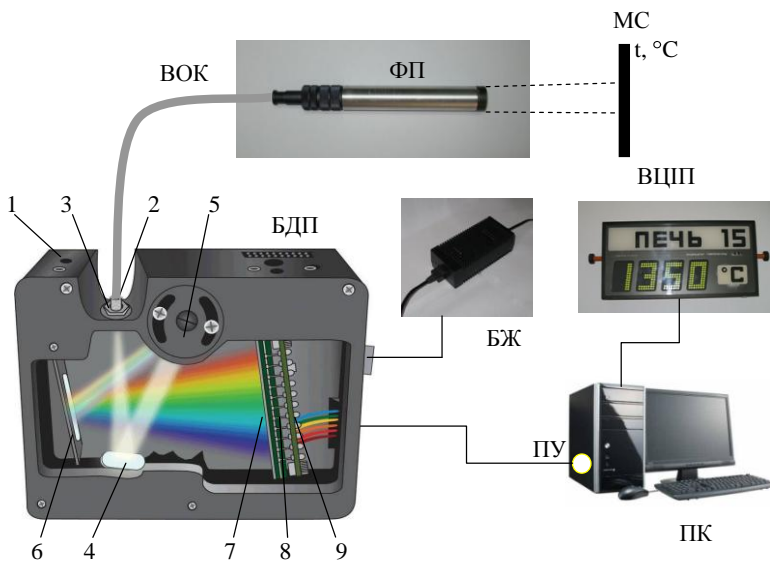


Рис. 7. Багатокольорова пірометрична система: ФП - фокусуючий пристрій; ВОК - волоконно-оптичний кабель; БДП - багатокольоровий детектуючий пристрій: 1 - пило-вологозахисний корпус; 2 - роз'єм SMA-905; 3 - вхідна щілина; 4 - колімуєче дзеркало; 5 - дифракційна решітка; 6 - фокусуюче дзеркало; 7 - збираюча лінза детектора; 8 - лінійний багатоточковий детектор випромінювання із зарядним зв'язком (ПЗС-детектор); 9 - система термостатування детектора випромінювання; ПК - комп'ютер з платою узгодження ПУ; БЖ - блок живлення БДП; ВЦП - виносний цифровий індикаторний пристрій.

термостатування детектора випромінювання; ПК - комп'ютер з платою узгодження ПУ; БЖ - блок живлення БДП; ВЦП - виносний цифровий індикаторний пристрій.

ФП створено на основі оптичної системи пірометрів часткового випромінювання ПЧД-121, параметри якої дозволяють досягти показників візування 1:50. У якості ВОК застосовується одножильний волоконно-оптичний кабель Thorlabs Inc. з діаметром волокна 1,0 мм із стандартними коннекторами типу SMA-905. БДП - найскладніший елемент системи, разом із ПУ є стандартними виробами компанії OceanOptics Inc. Для розробленої пірометричної системи використано БДП з кремнієвим детектором випромінювання SONY ILX511, що реєструє оптичний сигнал на 2048 вузькосмугових ділянках спектру в діапазоні 0,5 - 1,1 мкм з чутливістю 86 фотон /од (кількість фотонів на піксель на одиницю оцифрованого сигналу на виході 12-бітного АЦП) та співвідношенням сигнал шум 250:1. ПУ ADC500 з частотою роботи пристрою 500 кГц забезпечує час інтегрування сигналу при опитуванні від 5 мс. Для управління системою може бути використаний будь-який сучасний ПК.

Система працює наступним чином. ФП збирає випромінювання з видимої ділянки поверхні об'єкта на торці ВОК по якому передається до БДП, що здійснює подальше його перетворення у електричний сигнал, який через плату узгодження передається на ПК, що здійснює прийом-обробку інформації та управління системою.

У четвертому розділі розроблені методики і установки для експериментальних досліджень метрологічних характеристик методів і засобів багатокольорової СХПВ, а також наведені результати їх досліджень і практичного використання.

Досліджено вплив матеріалів і заглиблення в нагрівач печі моделі АЧТ на її ізотермічність і доведена перспективність використання міді для середніх температур. Встановлено, що в однакових умовах нагріву ізотермічність мідної порожнини в 3 рази вище, ніж у традиційної графітової і, тим більше, сталевій. Для ізотермічності на 10 радіусах оптимальне заглиблення мінімально для мідної моделі і становить 100 мм. При однаковому заглибленні у піч перепад температур поверхні дна і виходу випромінюючої порожнини ΔT мінімальний для мідного, зростає для графітового і максимальний для сталевий АЧТ. Наприклад, при заглибленні 100 мм ΔT на безрозмірній довжині порожнини 10 радіусів для мідної, графітової і сталевий моделей відповідно становить $\leq 0,5; 2,0$ і $6,0$ °С.

З використанням отриманих результатів розроблені методика, лінійний та універсальний методи і установки для отримання термодинамічно-рівноважного випромінювання з необхідними температурами для градування пірометричної системи та безфонового нагріву зразків для експериментальних досліджень.

Методика складається із:

- вибору довжин робочих хвиль з урахуванням апріорної інформації про спектральні розподіли випромінювальної здатності об'єктів, що термометруються і пропускання проміжних середовищ;
- вимірювань одноколірових температур випромінювання об'єкту, що термометрується S_1 , S_2 і S_3 на робочих довжинах хвиль λ_1 , λ_2 і λ_3 за допомогою відградуваної за термодинамічно рівноважним випромінюванням пірометричної системи;
- розрахунку дійсної температури T за розробленими теплофізичними моделями і алгоритмами багатокольорової лінійної та універсальної СХПВ;
- визначення похибок вимірювань СХПВ та веденню поправок.

Методика враховує специфіку багатокольорової пірометрії випромінювання, яка визначається встановленими закономірностями впливу оптичних характеристик металевих сплавів і симетрично-хвильової термометрії на її метрологічні характеристики, кількістю робочих довжин хвиль і призначенням СХПВ для вимірювань температури об'єктів з випромінювальною здатністю, що випадково змінюється. Методика визначає вимоги до експериментальних установок отримання термодинамічно-рівноважного випромінювання та нагрівання досліджуваних зразків.

Експериментальна нагрівальна установка забезпечує нагрів, що виключає вплив фонового випромінювання, вимірювання температури досліджуваних зразків T і температур їх випромінювання S_1 , S_2 і S_3 на робочих хвилях λ_1 , λ_2 і λ_3 , а також обробку первинної пірометричної інформації за алгоритмами СХПВ і результатів порівняльних вимірювань.

Дослідження виконані у видимій та ближній інфрачервоній областях спектру на стабільних, в умовах експерименту, і часто використовуваних для цих цілей графіті, алунді і платині. Спектральні розподіли випромінювальної здатності експериментальних матеріалів представницькі для відповідно вуглецевих, вуглецевмісних та оксидних вогнетривких матеріалів, а також залізовуглецевих сплавів, що найбільш широко використовуються в металургії.

В результаті виконаних експериментальних досліджень доведено, що при невідомій стабільній випромінювальній здатності похибки вимірювань СХПВ менше методичних складових відомої багатокольорової, а також класичної енергетичної та

спектрального відношення пірометрії випромінювання відповідно в 2,3; 4,9 - 13,2 і 3,1 - 3,6 рази. У найбільш жорстких термометричних умовах металургії, тобто при випадкових кількісних і якісних змінах випромінювальної здатності та її спектральних розподілів, наприклад, у випадку залізовуглецевих сплавів, що окислюються некоректовані похибки СХПВ у 8,4 і 7,2 рази менше коректованих на випромінювальну здатність похибок відповідно енергетичної та спектрального відношення пірометрії випромінювання.

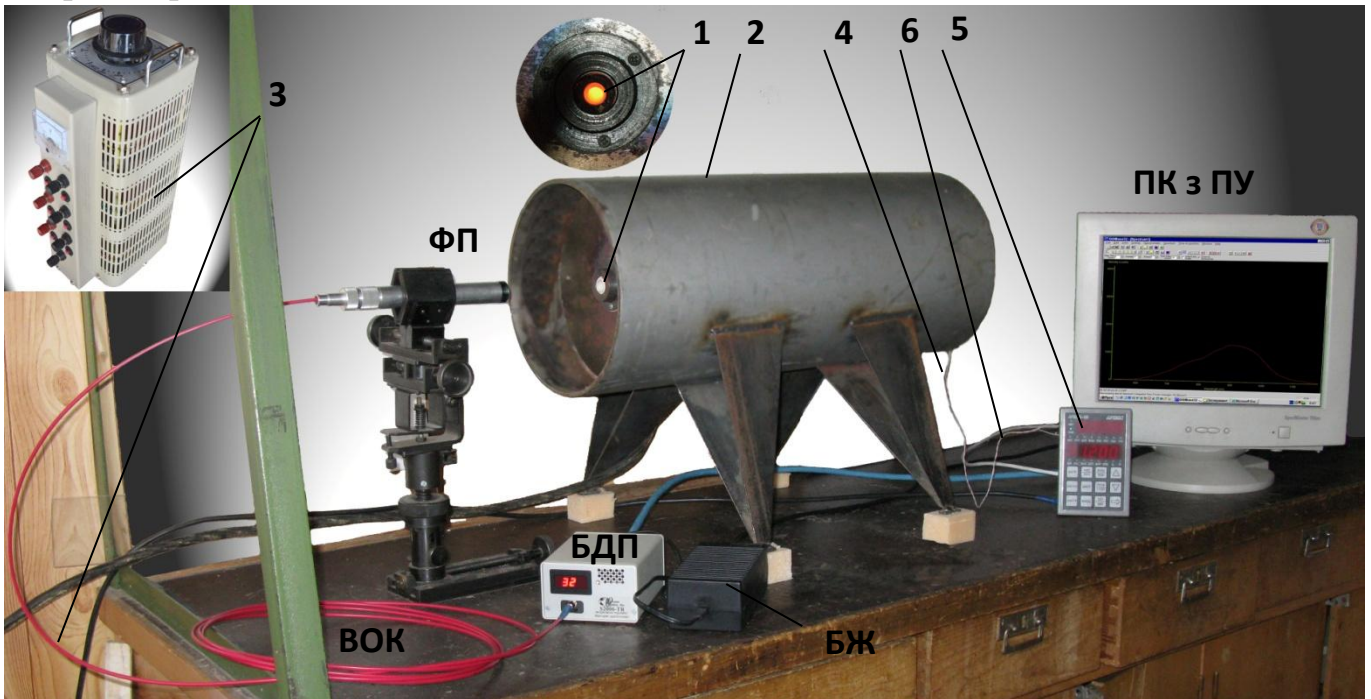


Рис. 8. Установа для отримання термодинамічно-рівноважного випромінювання з необхідними температурами: мідна модель АЧТ 1, нагрівальна піч 2 з джерелом електроживлення 3, термоелектричний перетворювач 4 з вторинним вимірювальним перетворювачем 5, перетворювач інтерфейсу 6 і багатокольорова пірометрична система, яка включає ФП, ВОК, БДП з БЖ та ПК з ПУ.

Для вирішення проблеми безперервного високотемпературного термоконтролю у ФТІМС НАН України організовані і виконані численні дослідження та довготривалі випробування у промислових умовах світловодних та безконтактних методів. Експлуатація на вітчизняних і зарубіжних підприємствах показала, що розроблені та досліджені термометричні технології:

- забезпечують безперервний контроль температури металевих розплавів безпосередньо в металургійних агрегатах, у тому числі агрегатах закритого типу, на всіх етапах технології отримання та розливання рідкого металу;
- перспективні для використання на конвертерах і вагранках; доменних, електродугових, нагрівальних, скловарних і коксових печах; установках безперервного розливу та іншому теплотехнічному обладнанні;
- не ускладнюють експлуатацію металургійного обладнання, у тому числі завантаження шихтових матеріалів і злив металу;
- зручні в обслуговуванні і перспективні для використання з серійними пірометричними перетворювачами і приладами мікропроцесорної техніки з метою само-

контролю, автоматичного визначення та введення температурних поправок і регулювання температури;

- дозволяють знизити енерговитрати і угар шихтових матеріалів, виключити брак і аварії, обумовлені порушенням температурних режимів, підвищити термін служби футерівки і продуктивність металургійного обладнання, внаслідок чого мають незначний термін окупності.

Ці технології забезпечують цілком прийнятні для практики метрологічні характеристики термоконтролю при стабільній випромінювальній здатності і відповідній адаптації. Проте такі умови в металургії швидше є винятком, ніж правилом. При невиконанні або порушенні умов адаптації похибки вимірювань підвищуються в кілька разів і не відповідають вимогам виробництв. Навіть похибки в 1% не завжди прийнятні для металургійних умов, наприклад, для екстремального регулювання дуття ваграночного процесу. Похибка термоконтролю повинна бути незначною у порівнянні з можливим підвищенням температури чавуну в 30 - 40 ° С. Такі метрологічні характеристики недоступні для класичної енергетичної та спектрального відношення пірометрії випромінювання, але цілком реальні для багатокольорової СХПВ.

Модернізація на базі СХПВ-технологій дозволяє підвищити метрологічні характеристики і розширити область практичного використання у металургії найбільш ефективного безперервного світловодного і безконтактного термоконтролю. Безальтернативний оптичний безперервний термоконтроль забезпечує оптимальне управління металургійними, в тому числі індукційними, ваграночними і електродуговими процесами отримання, обробки та розливання рідкого металу. Це дозволяє стабільно отримувати металопродукцію із заданими властивостями при мінімально можливих ресурсовитратах.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

В результаті теоретичних і експериментальних досліджень розроблені методи і засоби багатокольорової симетрично-хвильової пірометрії випромінювання, які підвищують метрологічні характеристики і розширюють сферу застосування у металургії оптичної термометрії, безальтернативної для безперервного світловодного і безконтактного термоконтролю металевих сплавів в процесах їх плавки, обробки і розливання. При цьому отримано такі основні наукові та практичні результати:

1. Показано значення вимірювань температури в металургії, а також безальтернативність та обмеження оптичної термометрії для безперервного термоконтролю. Обґрунтовано перспективність багатокольорової термометрії в умовах оптичних характеристик металевих сплавів, що випадково змінюються. Класифіковані технології багатокольорової термометрії і розроблені вимоги до неї, для виконання яких наведено перелік поставлених завдань.

2. Вивчено закономірності впливу оптичних характеристик багатокольорової термометрії і металевих сплавів, на методичні похибки лінійної СХПВ у видимій та ближній інфрачервоній областях спектру. В результаті досліджень встановлено, що:

2.1. При оптимальній ширині спектрального діапазону $\Delta\lambda$ методичні похибки зменшуються в 1,8 - 2,2 рази для будь-яких розподілів ϵ . При цьому похибка мінімальна для спадаючих опуклих спектральних розподілів ϵ залізовуглецевих сплавів, в

1,8 - 3,0 разів менше похибок для інших розподілів і вибором відповідних значень $\Delta\lambda < 0,1$ мкм, в принципі, може бути зменшена до нуля.

2.2. Вплив довжини середньої хвилі λ_2 має екстремальний характер на $\lambda_{2\max} = 0,8$ мкм для всіх розподілів ε . При зміщенні λ_2 в інфрачервону і видиму області спектру похибки відповідно зменшуються в 1,1 - 4,8 і 1,1 - 2,1 рази.

2.3. Характер і не лінійність, що визначається коефіцієнтом K_n , спектральних розподілів ε має домінуючий вплив на похибки. Зі зміною характеру розподілів ε похибки змінюються в 1,8 - 2,4 рази. Причому для всіх розподілів ε , при граничному двократному збільшенні коефіцієнта нелінійності, похибки зростають в 2,0 - 2,9 разів.

2.4. Прямий вплив коефіцієнта крутизни K_k спектральних розподілів ε на похибки відсутній.

2.5. Відповідно до термодинамічних законів теплового випромінювання та узагальнюючого пірометричного рівняння СХПВ залежності похибок від ε мають монотонний експоненціальний спадаючий характер.

2.6. Для об'єктів з термодинамічно-рівноважними, сірими, а також забарвленими зростаючими і спадаючими лінійними розподілами ε похибки дорівнюють нулю. Для решти розподілів методичні похибки лінійної СХПВ в 9,1 - 25,0 і 5,9 - 6,8, а також 2,4 - 3,3 рази нижче методичних похибок відповідно класичної енергетичної однокольорової і спектрального відношення двокольорової, а також відомої багатокольорової пірометрії випромінювання. При оптимізації оптичних характеристик СХПВ ($\Delta\lambda = 0,3$ мкм, $\lambda_2 = 1,1$ мкм) похибки для спадаючих опуклих розподілів ε залізовуглецевих сплавів додатково зменшуються від 0,50 до 0,13%.

2.7. Похибки мають систематичний характер, з різними знаками, залежно від розподілів ε . Це допускає використання лінійної СХПВ з усередненням результатів порівняльних вимірювань температури об'єктів з більш значною нелінійністю розподілів ε , при введенні температурних поправок.

3. Для спадаючих опуклих розподілів ε інструментальні похибки СХПВ мінімальні, іноді близькі або значно нижче однаково розподілених по знаках і рівних за величиною похибок вихідних вимірювань температур випромінювання.

4. З використанням установлених закономірностей та сучасної оптоелектроніки розроблені методи і засоби СХПВ металевих сплавів.

4.1. Методи трьохкольорової лінійної та універсальної СХПВ засновані на залежностях ε_2 металевих сплавів на середній хвилі λ_2 від ε_1 і ε_3 на симетрично розташованих граничних хвилях λ_1 і λ_3 . Лінійний метод дозволяє виключити методичні похибки для лінійних розподілів ε об'єктів, що термометруються, у тому числі вкритих оксидними плівками металевих розплавів та іммерсійних світловодів, а також значно знизити їх для інших забарвлених розподілів ε і насамперед для розподілів ε залізовуглецевих сплавів. Універсальний метод за рахунок використання критерію відповідності дозволяє виключити домінуючі в оптичній термометрії методичні складові з похибки вимірювань температури об'єктів з будь-якими спектральними розподілами ε .

4.2. Принцип дії багатокольорової пірометричної системи заснований на вимірюванні однокольорових температур випромінювання об'єктів, що термометруються

на робочих хвилях λ_1 , λ_2 і λ_3 з подальшою обробкою цієї інформації за алгоритмами багатокольорової лінійної або універсальної СХПВ.

5. Доведено перспективність використання міді для середньотемпературних моделей АЧТ. Розроблено методику та установки для експериментальних досліджень метрологічних характеристик багатокольорової СХПВ.

Методика враховує специфіку СХПВ і визначає вимоги до експериментальних установок отримання термодинамічно-рівноважного випромінювання та нагрівання зразків об'єктів, що термометруються.

6. Експериментальними дослідженнями підтверджено результати теоретичних досліджень і доведено, що похибки вимірювань СХПВ менше методичних складових відомої багатокольорової, а також класичної енергетичної та спектрального відношення пірометрії випромінювання відповідно в 2,3; 4,9 - 13,2 і 3,1 - 3,6 рази.

7. СХПВ-технології за рахунок підвищення метрологічних характеристик розширюють область застосування в металургії безперервного світловодного і безконтактного термоконтролю. Він дозволяє стабільно отримувати металопродукцію із заданими властивостями при мінімально можливих ресурсовитратах за рахунок зниження витрат електроенергії і палива (6 - 70%), браку «по температурі» (20 - 100%), угару шихтових матеріалів (5 - 30%) а також підвищення терміну служби футерівки (25 - 90%) і продуктивності печей (20 - 30%) і виключення аварій, пов'язаних з надмірним нагріванням або охолодженням металу. За рахунок високої ефективності і техніко-економічних показників термін окупності безперервного термоконтролю зазвичай не перевищує 12 місяців при максимальній продуктивності металургійного обладнання.

8. Розроблені технології були передані у складі систем безперервного світловодного та безконтактного температурного контролю до DOSIC (КНР).

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Жуков Л. Ф. Новые технологии многоцветовой симметрично-волновой термометрии / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко. – Саарбрюккен, Германия: LAMBERT Academic Publishing, - 2014. – 161 с. – ISBN: 978-3-659-58131-1.

2. Жуков Л. Ф. Исследование стабильности оптических термометрических характеристик жидкого чугуна / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко, Н. Ф. Зубенина // Металл и литье Украины. – 2011. - № 8. С. 29 – 33.

3. Жуков Л. Ф. Влияние химического состава на излучательные характеристики чугуна / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко, Н. Ф. Зубенина // Процессы литья. – 2011. - № 5. С. 68 – 71.

4. Инновационные технологии многоцветовой термометрии / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко, А. В. Богдан [и др.] // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2011. - № 73. – С. 45 – 51.

5. Жуков Л. Ф. История, состояние и перспективы развития температурных измерений в металлургии / Л. Ф. Жуков, Д. А. Петренко, А. Л. Корниенко // Металл и литье Украины. – 2012. - № 7. С. 27 – 34.

6. Новые технологии многоцветового бесконтактного и световодного термоконтроля металлических сплавов / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко, А. В. Богдан [и др.] // *Металл и литье Украины*. – 2012. - № 9. С. 29 – 35.
7. Жуков Л. Ф. Симметрично-волновая многоцветовая термометрия металлургических объектов с неизвестной и случайно изменяющейся излучательной способностью / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко // *Металл и литье Украины*. – 2012. - № 11. С. 36 – 40.
8. Жуков Л. Ф. Исследование влияния оптических характеристик пирометрии излучения на погрешности линейной многоцветовой симметрично-волновой термометрии / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко // *Світлотехніка та електроенергетика*. – 2014. - № 3-4. С. 44 – 52.
9. Жуков Л. Ф. Влияние спектральных характеристик систем пирометрии излучения на методические погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой термометрии металлургических объектов / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко // *Металл и литье Украины*. – 2013. - № 2. С. 27 – 32.
10. Жуков Л. Ф. Исследование влияния термометрических характеристик металлических сплавов на погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко // *Металл и литье Украины*. – 2013. - № 3. С. 21 – 25.
11. Жуков Л. Ф. Влияние излучательной способности на систематические погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения в металлургии / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко // *Металл и литье Украины*. – 2013. - № 4. С. 30 – 34.
12. Корниенко А. Л. Исследование инструментальных погрешностей многоцветовой симметрично-волновой термометрии металлических сплавов / А. Л. Корниенко, Л. Ф. Жуков // *Вісник національного університету «Львівська політехніка», «Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація»*. – 2014. – № 795. С. 7 – 16.
13. Жуков Л. Ф. Универсальная многоцветовая симметрично-волновая термометрия объектов металлургии с линейными и нелинейными спектральными распределениями излучательной способности / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко // *Промышленная теплотехника*. – 2013. – том 35. – № 4. С. 88 – 95.
14. Жуков Л. Ф. Новые технологии многоцветовой симметрично-волновой термометрии и их метрологические характеристики / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. - № 2 (87). – С. 473 – 482.
15. Корниенко А. Л. Экспериментальные исследования метрологических характеристик многоцветовой симметрично-волновой пирометрии излучения материалов металлургии / А. Л. Корниенко, Л. Ф. Жуков // *Промышленная теплотехника*. – 2014. – том 35. – № 5. С. 89 – 97.
16. Жуков Л. Ф. Термоэлектрический сменный преобразователь погружения для периодических измерений температуры металлических расплавов / Л. Ф. Жуков, Д. А. Петренко, А. Л. Гончаров, А. Л. Корниенко // *Металл и литье Украины*. – 2014. - № 10. С. 29 – 33.

17. Пат. 76096 Украина, МПК G01J 5/00. Способ измерения температуры / Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л.; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. - №u201206525; заявл. 29.05.12; опубл. 25.12.12, Бюл. №24.
18. Пат. 76096 Украина, МПК G01J 5/00. Способ измерения температуры / Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л.; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. - №u201206525; заявл. 29.05.12; опубл. 25.12.12, Бюл. №24.
19. Пат. 86030 Украина, МПК G01J 5/00. Способ измерения температуры / Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л.; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. - №u201307374; заявл. 11.06.13; опубл. 10.12.13, Бюл. №23.
20. Пат. 87353 Украина, МПК G01J 5/00. Способ измерения температуры / Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л.; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. - №u201307161; заявл. 06.06.13; опубл. 10.02.14, Бюл. №3.
21. Пат. 53961 А Украина, МПК G01J 5/00. Способ измерения температуры / Жуков Л. Ф., Богдан А. В., Корниенко А. Л.; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. - №2002032499; заявл. 29.03.02; опубл. 17.02.03, Бюл. №2.
22. Пат. 95334 Украина, МПК G01K 13/12; G01K 7/02. Прибор для измерения температуры жидких и газообразных сред / Жуков Л. Ф., Петренко Д. А., Гончаров А. Л., Корниенко А. Л.; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. - №u201405786; заявл. 29.05.14; опубл. 25.12.14, Бюл. №24.
23. Жуков Л. Ф. Бесконтактный непрерывный контроль температуры жидкого металла на выпуске и сливе из металлургических печей и агрегатов / Л. Ф. Жуков, В. В. Дроздовский, А. Л. Корниенко // «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование экономика и экология»: I междунар. науч.-практ. конф.-выставка, 12 – 14 декабря 2011.: матер. МНПК – Киев, 2011. – С. 106 – 108.
24. Жуков Л. Ф. Многоцветовая пирометрия излучения металлических сплавов / Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан, В. М. Крупник, Л. В. Крупник, А. Л. Корниенко, Н. Ф. Зубенина // «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование экономика и экология»: II междунар. науч.-практ. конф., 19 – 21 ноября 2012.: матер. МНПК – Киев, 2012. – С. 112 – 113.
25. Корниенко А. Л. Симметрично-волновая многоцветовая термометрия в металлургии / А. Л. Корниенко // матер. конф. молод. уч. ФТИМС НАНУ., 8 – 10 октября 2012.: Металл и литье Украины. – 2013. - № 1. - С. 32 – 33.
26. Корниенко А. Л. Влияние оптических характеристик пирометрии излучения на методические погрешности симметрично-волновой термометрии металлических сплавов / А. Л. Корниенко, Л. Ф. Жуков // «Литье 2013»: IX междунар. науч.-практ. конф., «Металлургия 2013»: II междунар. науч.-практ. конф., 21 – 23 мая 2013.: матер. МНПК – Запорожье, 2013. – С. 107 – 108.
27. Корниенко А. Л. Новые технологии многоцветовой симметрично-волновой термометрии объектов металлургии и их метрологические характеристики / А.Л. Корниенко, Л.Ф. Жуков // «Литье 2014»: X междунар. науч.-практ. конф., «Металлургия 2014»: III междунар. науч.-практ. конф., 27 – 29 мая 2014.: матер. МНПК – Запорожье, 2014. – С. 107 – 110.

Анотація

Корнієнко А. Л. Методи і засоби багатокольорової симетрично-хвильової термометрії металевих сплавів. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.04. «Прилади та методи вимірювання теплових величин». Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. Київ, 2015.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми підвищення точності та розширення області застосування найбільш ефективного і безальтернативного безперервного оптичного контролю температури металевих сплавів у виробничих умовах невідомої постійної випромінювальної здатності або такої, що випадково змінюється. Проблема вирішена на основі взаємозв'язків випромінювальної здатності металевих сплавів на середній і симетрично розподілених по спектру граничних хвилях.

З використанням встановлених закономірностей, розроблених математичних моделей і сучасної оптоелектроніки створені лінійний і універсальний методи, а також засоби багатокольорової СХПВ металевих сплавів. Розроблено методику та установки для експериментальних досліджень метрологічних характеристик багатокольорової СХПВ.

Розроблені СХПВ технології, за рахунок більш високих метрологічних характеристик, підвищують точність і розширюють сферу застосування в металургії безальтернативного безперервного световодного і безконтактного термоконтролю.

Ключові слова: оптична термометрія, пірометрія випромінювання, температура об'єкта, температура випромінювання об'єкта, багатокольорова симетрично-хвильова пірометрія випромінювання, металевий сплав, випромінювальна здатність, спектральний розподіл випромінювальної здатності, похибка.

Аннотация

Корниенко А. Л. Методы и средства многоцветовой симметрично-волновой термометрии металлических сплавов. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.04. «Приборы и методы измерения тепловых величин». Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины. Киев, 2015.

Диссертация посвящена решению актуальной проблемы повышения точности и расширения области применения наиболее эффективного и безальтернативного непрерывного оптического контроля температуры металлических сплавов в производственных условиях неизвестной постоянной или случайно изменяющейся излучательной способности. Проблема решена на основе взаимосвязей излучательной способности металлических сплавов на средней и симметрично распределенных по спектру граничных длинах волн.

В результате анализа показано доминирующее место измерений температуры, в том числе оптических, в структуре метрологического обеспечения металлургии. Обоснована перспективность интенсивно развиваемой сейчас многоцветовой термометрии в металлургических условиях. Классифицированы технологии многоцветовой термометрии и разработаны требования к ней, для выполнения которых приведен перечень поставленных задач.

Разработано обобщающее пирометрическое уравнение (математическая модель) и выполнен комплекс исследований влияния оптических характеристик многоцветовой термометрии и металлических сплавов на методические погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения (СВПИ) в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Установлено, что для объектов с термодинамически равновесными, серыми, а также окрашенными возрастающими и спадающими линейными распределениями ϵ погрешности равны нулю. Для остальных распределений погрешности линейной СВПИ в 9,1 – 25,0 и 5,9 – 6,8, а также 2,4 - 3,3 раза ниже погрешностей соответственно классической энергетической одноцветовой и спектрального отношения двухцветовой, а также известной многоцветовой пирометрии излучения. При оптимизации оптических характеристик СВПИ погрешности для наиболее распространенных железоуглеродистых сплавов дополнительно уменьшаются в 1,1 – 4,8 раза.

Для железоуглеродистых сплавов инструментальные погрешности СВПИ минимальны, иногда близки или, в основном, значительно ниже одинаково распределенных по знакам и равных по величине погрешностей исходных измерений температур излучения.

С использованием установленных закономерностей, разработанных математических моделей и современной оптоэлектроники созданы линейный и универсальный методы, а также средства многоцветовой СВПИ металлических сплавов. Первый метод позволяет исключить методические погрешности для линейных распределений излучательной способности термометрируемых объектов, в том числе покрытых оксидными пленками металлических расплавов и иммерсионных световодов, а также значительно снизить их для остальных окрашенных распределений ϵ и прежде всего для распределений ϵ железоуглеродистых сплавов. Универсальный метод за счет использования критерия соответствия позволяет исключить доминирующие в оптической термометрии методические составляющие из погрешности измерений температуры объектов с любыми спектральными распределениями ϵ . Принцип действия многоцветовой пирометрической системы основан на измерениях одноцветовых температур излучения термометрируемых объектов на рабочих волнах λ_1 , λ_2 и λ_3 с последующей обработкой этой информации по алгоритмам многоцветовой линейной или универсальной СВПИ.

Доказана перспективность использования меди для среднетемпературных моделей абсолютно черного тела. Разработаны методика и установки для экспериментальных исследований метрологических характеристик многоцветовой СВПИ.

Методика учитывает специфику СВПИ и определяет требования к экспериментальным установкам получения термодинамически равновесного излучения и нагрева образцов термометрируемых объектов. Экспериментальными исследованиями подтверждены результаты теоретических исследований и доказано, что погрешности измерений СВПИ меньше методических составляющих известной многоцветовой, а также классической энергетической и спектрального отношения пирометрии излучения соответственно в 2,3; 4,9 – 13,2 и 3,1 – 3,6 раза.

Разработанные СВПИ-технологии, за счет более высоких метрологических характеристик, повышают точность и расширяют область применения в металлургии безальтернативного непрерывного световодного и бесконтактного термоконтроля.

Оптический непрерывный термоконтроль обеспечивает стабильное получение металлопродукции с заданными свойствами при минимально возможных ресурсозатратах и максимальной производительности металлургического оборудования.

Ключевые слова: оптическая термометрия, пирометрия излучения, температура излучения объекта, многоцветовая симметрично-волновая пирометрия излучения, металлический сплав, спектральное распределение излучательной способности.

Abstract

Korniienko A. L. Methods and means of multicolor symmetrical-wave pyrometry radiation of metal alloys. The manuscript.

The thesis for degree of Candidate of technical sciences, specialty 05.11.04. "Devices and methods for measuring thermal quantities." Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kiev, 2015.

Thesis deals with the actual problems of increasing accuracy and extending the scope of the most effective and non-alternative continuous optical temperature control of metal alloys in a production environment with unknown constant or accidentally changing emissivity. The problem is solved on the basis of relationships emissivity metal alloys on medium and symmetrically distributed over the spectrum boundary wavelengths.

With the use of established laws, developed mathematical models and modern optoelectronics created linear and universal methods and means of multicolor SWPR metal alloys. Developed technique and equipment for experimental studies of metrological characteristics of multicolor SWPR. Optical continuous thermocontrol provides stable reception of steel with specified properties at the lowest possible resource consumption and maximize performance of metallurgical equipment.

Keywords: optical thermometers, pyrometers radiation temperature of the object, the radiation temperature of the object, multicolor symmetrical wave radiation pyrometry, metal alloy, emissivity, spectral distribution of the emissivity error.

Підписано до друку _____ Формат 60x90/16.

Папір офсетний. Формат видання 145x215 мм.

Ум. друк. арк. 0,9. Обл.- вид. арк. 0,9.

Тираж 100 пр. Зам. № 20/11

ТОВ "Поліграф-Сервіс"

03057, м. Київ, вул. Желябова, 2а

Тел.: (044) 581-64-63