
ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 536.521.3

Л. Ф. Жуков, Д. А. Петренко, А. Л. Корниенко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ДВУХЦВЕТОВАЯ КОМПЕНСАЦИОННАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ И ЕЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ

Предложена новая технология двухцветовой компенсационной термометрии, объединяющая преимущества многоцветовой термометрии по методическим погрешностям и классической спектрального отношения – по инструментальным. Установлен низкий уровень ее инструментальных погрешностей в условиях селективного изменения излучательной способности и поглощения промежуточной среды, а также отсутствие их зависимости от характера спектрального распределения излучательной способности термометрируемых сплавов. При одинаковых по знаку и равных по модулю инструментальных погрешностях измерений одноцветовых температур излучения инструментальные погрешности новой технологии практически совпадают с погрешностями классической двухцветовой термометрии, а при различных знаках – становятся пренебрежимо малыми.

Ключевые слова: металлургия, многоцветовая, двухцветовая компенсационная и спектрального отношения термометрия, инструментальная погрешность, знак погрешности, спектральное распределение излучательной способности, селективность, измеренные, зеркальные и сопряженные температуры излучения.

Запропоновано нову технологію двоколірової компенсаційної термометрії, яка поєднує переваги багатоколірової термометрії по методичним похибкам і класичної спектрального відношення – по інструментальним. Встановлено низький рівень її інструментальних похибок в умовах селективних змін випромінювальної здатності та поглинання проміжного середовища, а також відсутність їхньої залежності від характеру розподілу випромінювальної здатності сплавів, що термометруються. При однакових по знаку і рівних за модулем інструментальних похибках вимірювань одноколірових температур випромінювання інструментальні похибки нової технології практично співпадають з похибками класичної двоколірової термометрії, а при різних знаках – стають нехтовно малими.

Ключові слова: металлургия, багатоколіорова, двоколіорова компенсаційна та спектрального відношення термометрія, інструментальна похибка, знак похибки, спектральний розподіл випромінювальної здатності, селективність, виміряні, дзеркальні та спряжені температури випромінювання.

New technology of two colour compensating thermometry was proposed. It incorporates advantages of multicolour thermometry for methodical errors and advantages of classical spectral ratio pyrometry – for instrumental. It was proved that instrumental errors of this technology are low under conditions of selective changes of emissivity and absorptivity, as well as absence of errors dependences on character of emissivity spectral distributions of alloys to be measured. When instrumental

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

errors of one-colour temperatures have the same signs and absolute values, instrumental errors of new technology are practically equal to errors of classical spectral ratio pyrometry, but when the signs are different instrumental errors of proposed technology became negligible small.

Keywords: *metallurgy, multicolour, two-colour compensating and spectral ratio thermometry, instrumental error, sign of error, spectral distribution of emissivity, selectivity, measured and mirror temperatures of emission.*

Температурные режимы получения, обработки и разлива жидкого металла, при заданном химическом составе сплава, футеровки и атмосферы, определяют качество готовой металлопродукции и ресурсозатраты, в том числе энергозатраты на ее производство [1]. Поэтому, на долю термоконтроля приходится 28,9 % в структуре метрологического обеспечения металлургии, включающей также измерения расхода (23,2 %), давления (18,8 %), уровня (10,1 %), химического состава (5,2 %), степени открытия (3,9 %), массы (3,6 %), вибрации (1,0 %) и других параметров (5,3 %) [2]. Для измерений температуры в металлургии используются преимущественно бесконтактные оптические и контактные термоэлектрические технологии. Термоэлектрические термометры являются самым эффективным средством для периодических измерений температуры. Применение их для непрерывного термоконтроля ограничено теплофизическими и химическими свойствами защитной арматуры, а также недостаточной стабильностью номинальных статических характеристик преобразования (НСХ). Например, НСХ наиболее стабильного термоэлектрического преобразователя типа ТПП (S) в нормальной среде, при температуре 1300 °С, за 24 ч изменяется на 1 % [1]. Поэтому для непрерывного термоконтроля высокотемпературных, малогабаритных и движущихся металлургических объектов оптическая термометрия не имеет альтернативы. Первые оптические термометры были созданы именно для металлургии. В частности, Д.И. Менделеевым описано применение визуального пирометра на Урале в конце 80-х годов XIX века. Почти одновременно такой прибор был разработан Ле Шателье во Франции [3]. Классические одно- и двухцветовые технологии оптической термометрии успешно используются с введением температурных поправок на объектах со стабильными излучательными характеристиками и пропусканием промежуточной среды. Без введения температурных поправок их можно применять в случае черного тела для одно-, а также черного и серого тел для двухцветовой пирометрии излучения.

Металлургические объекты термоконтроля, как правило, характеризуются нестабильными оптическими характеристиками. В этих условиях самой эффективной является многоцветовая пирометрия излучения. Наиболее значимые результаты в данной области достигнуты в Украине, России, Беларуси, Японии, Германии и США. С 2001 г. отделом термометрии и физико-химических исследований ФТИМС НАН Украины велись работы по 3-м направлениям многоцветовой термометрии: параболической аппроксимации, спектрально-компенсационной и симметрично-волновой [4]. Наиболее исследована – симметрично-волновая пирометрия излучения (СВПИ).

По сравнению с классической, многоцветовая термометрия обеспечивает значительное снижение методических погрешностей при случайно изменяющихся излучательных характеристиках объекта. Для ряда распределений излучательной способности возможно полное исключение методических погрешностей. Главный недостаток многоцветовой термометрии – существенное возрастание инструментальных погрешностей при увеличении количества рабочих волн. Например, для детерминированной многоцветовой пирометрии излучения связь инструментальных погрешностей с количеством рабочих волн определяется формулой (1) [5]. Для упрощения здесь принято, что погрешности измерений яркостей $\delta_I = \delta_{I1} = \delta_{I2} = \dots = \delta_{In}$ на соответствующих рабочих волнах $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ одинаковы по модулю и знаку. Промежутки $\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_3 - \lambda_2 = \dots = \lambda_n - \lambda_{n-1} = (\lambda_n - \lambda_1)/(n - 1)$ между рабочими волнами также одинаковы.

$$\delta_{T_{расч}} = \frac{T_{расч}}{C_2} b_n k_n \delta_I, \tag{1}$$

где $T_{расч}$ – расчетная температура объекта; $C_2 = 0,014388 \text{ К}\cdot\text{м}$ – вторая постоянная Планка; $b_n = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n}{\Delta \lambda^{n-1}}$; $\Delta \lambda = \lambda_n - \lambda_1$; $k_n = (n-1)^{n-1} \sqrt{\sum_{i=2}^n \left[\frac{1}{(i-1)!(n-1)!} \right]^2}$, здесь i – порядковый номер волны, n – количество рабочих волн.

Относительные погрешности измерений одноцветовых температур излучения и соответствующих им яркостей [5] связаны формулой

$$\delta_{S_i} = \frac{\lambda_i S_i}{C_2} \delta_{I_i}, \tag{2}$$

где S_i – одноцветовая температура излучения на λ_i .

Количественные оценки погрешностей измерений S_i на выбранных λ_i , коэффициентов b_n, k_n , а также инструментальных погрешностей многоцветовой детерминированной термометрии вольфрама при $T=1200 \text{ К}$, $\delta_I = 2 \%$ представлены в табл. 1.

Таблица 1. Инструментальные погрешности многоцветовой детерминированной термометрии вольфрама при $T=1200 \text{ К}$, $\delta_I = 2 \%$

Рабочие волны, мкм				Погрешности измерений, %				b_n , МКМ	k_n	$\delta_{T_{расч}}$, %
λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	δ_{S_1}	δ_{S_2}	δ_{S_3}	δ_{S_4}			
0,5	0,8	–	–	0,08	0,13	–	–	1,33	1,41	0,3
0,5	0,65	0,8	–	0,08	0,1	0,13	–	2,89	4,90	2,4
0,5	0,6	0,7	0,8	0,08	0,1	0,11	0,13	6,22	20,1	21,0
0,5	1,4	–	–	0,08	0,2	–	–	0,78	1,41	0,2
0,5	0,95	1,4	–	0,08	0,15	0,2	–	0,82	4,90	0,7
0,5	0,8	1,1	1,4	0,08	0,13	0,17	0,2	0,84	20,1	2,8

Из табл. 1 следует, что при переходе от классической пирометрии спектрального отношения к 3-х цветовой детерминированной термометрии инструментальные погрешности возрастают в 8,0 и 3,5 раза в спектральных диапазонах 0,5-0,8 и 0,5-1,4 мкм. Переход от трех- к четырехцветовой термометрии приводит к дополнительному росту погрешностей в 8,7 и 4,0 раза соответственно (рис. 1).

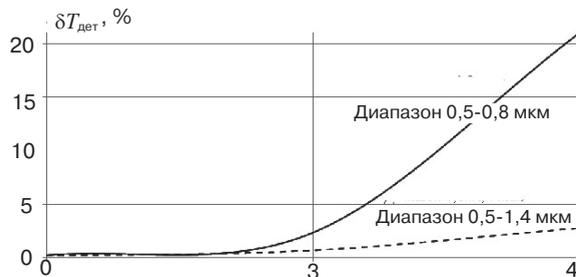


Рис. 1. Зависимости инструментальных погрешностей многоцветовой детерминированной термометрии от количества рабочих волн

При расширении рабочего спектрального диапазона инструментальные погрешности резко снижаются. Например, при изменении диапазона от 0,5-0,8 до 0,5-1,4 мкм погрешности для 3-х и 4-х волн соответственно снижаются в 3,4 и 7,5 раз. Это объясняется значительным уменьшением b_n за счет увеличения $\Delta \lambda$, при постоянном k_n (1).

Кроме ширины рабочего спек-

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

трального диапазона, большое влияние на инструментальные погрешности многоцветовой термометрии оказывают модули и знаки погрешностей измерений одноцветовых температур излучения, а также характер распределения излучательной способности металлического сплава. Влияние этих параметров было изучено для СВПИ в работе [6]. В табл. 2 приведены инструментальные погрешности СВПИ для наиболее характерного для железоуглеродистых сплавов спадающего линейаризованного (в спектральном диапазоне 0,5-1,4 мкм) распределения излучательной способности вольфрама (СЛав) с $T = 1600$ К, при различных распределениях знаков и модулях погрешностей измерений одноцветовых температур излучения.

Таблица 2. Инструментальные погрешности СВПИ вольфрама при $T = 1600$ К; $\lambda_1 = 0,5$ мкм; $\lambda_2 = 0,8$ мкм; $\lambda_3 = 1,1$ мкм

Знаки погрешностей $\delta_{S_1}, \delta_{S_2}, \delta_{S_3}$	$\delta_{T_{СВПИ}}, \%$ при $ \delta_{S_1, S_2, S_3} = 0,2 \%$	$\delta_{T_{СВПИ}}, \%$ при $ \delta_{S_1, S_2, S_3} = 0,5 \%$	$\delta_{T_{СВПИ}}, \%$ при $ \delta_{S_1, S_2, S_3} = 1,0 \%$
+ + +	0,2	0,5	1,0
- - -	-0,2	-0,5	-1,0
+ + -	0,45	0,8	-1,4
- - +	0,5	1,5	6,2
- + +	-1,5	-3,2	-4,3
+ - -	-2,0	-4,2	-7,5
- + -	1,6	4,3	11,0
+ - +	2,4	9,0	-

Инструментальные погрешности СВПИ не превышают погрешностей измерений одноцветовых температур излучения при одинаковых их знаках в наиболее характерных для металлургии условиях спадающих распределений излучательной способности. Для различных знаков, например за счет селективного поглощения излучения промежуточной средой, инструментальные погрешности резко возрастают и принимают недопустимые для технологического контроля значения. Это объясняется эквивалентным повышением коэффициента нелинейности спектрального распределения излучательной способности при различных знаках погрешностей измерений одноцветовых температур излучения. Для других распределений, в частности возрастающего линейаризованного вольфрама (ВЛав), инструментальные погрешности СВПИ также резко возрастают, достигая неприемлемого в металлургической практике уровня 5-8 %.

С учетом анализа инструментальных погрешностей многоцветовой пирометрии излучения, преимущество для практического применения имеют технологии с минимально возможным количеством рабочих волн и наиболее простыми взаимосвязями между температурами термометрируемых объектов и их излучения. Л. Ф. Жуковым была предложена концепция двухцветовой компенсационной пирометрии излучения (ДКПИ), объединяющая преимущества СВПИ по методическим погрешностям и классической спектрального отношения – по инструментальным. Такой подход позволяет исключить методические погрешности классической пирометрии спектрального отношения специальной обработкой первичной пирометрической информации. Он основан на использовании измеренной $S_{2ц}$ и зеркальной $S'_{2ц}$ двухцветовых температур излучения термометрируемого сплава, по которым вычисляется его искомая температура. Измеренной двухцветовой температуре излучения сплава соответствует реальное, например спадающее распределение излучательной способности, а зеркальной – зеркально отраженное возрастающее.

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

При этом значения излучательной способности на рабочих волнах λ_1 и λ_2 находятся на уровнях ε_1 и ε_2 , то есть $\varepsilon_{\text{CP}}(\lambda_1) = \varepsilon_{\text{BP}}(\lambda_2)$ и $\varepsilon_{\text{CP}}(\lambda_2) = \varepsilon_{\text{BP}}(\lambda_1)$, где индекс CP обозначает спадающее распределение, BP – возрастающее; на средней длине волны

$\lambda_{\text{CP}} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$ уровни излучательной способности для обоих распределений совпа-

дают (рис. 2).

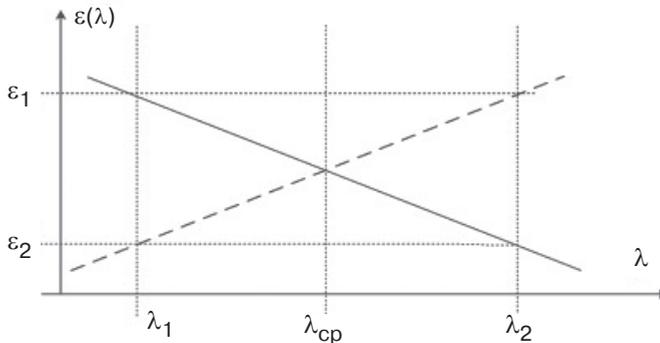


Рис. 2. Реальное спадающее (сплошная линия) и зеркальное возрастающее (пунктирная линия) распределения излучательной способности металлического сплава

В принципе возможна и обратная ситуация для реального возрастающего и зеркального спадающего распределений. При «сером» и термодинамически равновесном излучении реальные и зеркальные распределения совпадают.

Измеренная двухцветовая температура излучения связана с температурой T металлического сплава через соответствующие уровни излучательной способности ε_1 и ε_2

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S_{2\text{ц}}} = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{C_2} \ln\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{C_2} \ln(\varepsilon_{\text{ЭКВ}}), \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{ЭКВ}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$ – эквивалентная длина волны двухцветовой пирометрии.

Зеркальная двухцветовая температура излучения $S_{2\text{ц}}'$ связана с указанными

параметрами термометрируемого сплава аналогичным образом

$$\frac{1}{S_{2\text{ц}}'} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{C_2} \ln\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{C_2} \ln(\varepsilon_{\text{ЭКВ}}). \quad (4)$$

Двухцветовые температуры $S_{2\text{ц}}$ и $S_{2\text{ц}}'$ можно выразить через их одноцветовые температуры излучения [7], измеренные на λ_1 и λ_2

$$S_{2\text{ц}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ЭКВ}} \left(\frac{1}{\lambda_1 \cdot S_1} - \frac{1}{\lambda_2 \cdot S_2} \right)}; \quad (5)$$

$$S'_{2ц} = \frac{1}{\lambda_{\text{экв}} \left(\frac{1}{\lambda_1 \cdot S_1} - \frac{1}{\lambda_2 \cdot S_2} \right)}. \quad (6)$$

Одноцветовые температуры излучения образуют сопряженные по уровням излучательной способности пары $S_1 - S'_2$ и $S_2 - S'_1$. Связь температуры термометрируемого сплава с одноцветовыми температурами его излучения через излучательные способности и длины волн представлена двумя парами сопряженных уравнений:

$$\frac{1}{S_1} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda_1}{C_2} \ln \varepsilon_1; \quad (7)$$

$$\frac{1}{S'_2} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda_2}{C_2} \ln \varepsilon_1; \quad (8)$$

и

$$\frac{1}{S'_1} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda_1}{C_2} \ln \varepsilon_2; \quad (9)$$

$$\frac{1}{S_2} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda_2}{C_2} \ln \varepsilon_2. \quad (10)$$

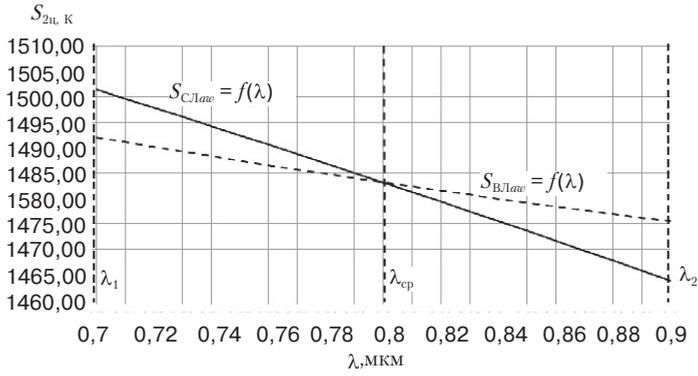
На рис. 3 представлены зависимости одно- и двухцветовых температур излучения для реального (СЛав) и зеркального (ВЛав) распределений излучательной способности вольфрама соответственно от длины рабочей и эквивалентной волн. Обозначены рабочие волны, для которых выполняется условие сопряженности температур излучения.

Из формул (3, 4) видно, что обратные значения измеренной и зеркальной двухцветовых температур излучения смещены относительно обратного значения температуры сплава на одну и ту же величину, которая определяется отношением излучательных способностей термометрируемого сплава на рабочих волнах. Соответственно, полусумма прямых значений двухцветовых температур смещена относительно температуры сплава на величину, зависящую от его температуры и селективности излучения. Поэтому, для исключения методической погрешности необходимо брать полусумму обратных значений двухцветовых температур излучения

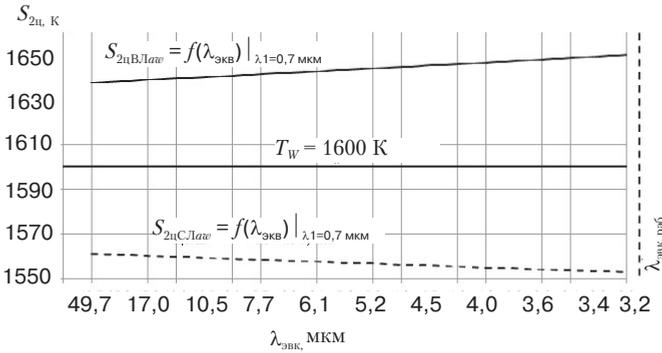
$$\frac{1}{T} = \frac{\frac{1}{S_{2ц}} + \frac{1}{S'_{2ц}}}{2} \Rightarrow T = \frac{2}{\frac{1}{S_{2ц}} + \frac{1}{S'_{2ц}}}. \quad (11)$$

Для определения температуры термометрируемого сплава необходимо знать зеркальные одноцветовые температуры излучения.

Для обоснования ДКПИ были изучены ее инструментальные погрешности при различных модулях и знаках погрешностей измерений одноцветовых температур излучения вольфрама с $T=1600$ К. Для исключения методической составляющей



а



б

Рис. 3. Зависимости одно- (а) и двухцветовых (б) температур излучения от λ и $\lambda_{\text{эвк}}$ для реального (СЛав) и зеркального (ВЛав) распределений излучательной способности вольфрама с $T = 1600 \text{ K}$

излучательная способность на рабочих волнах принята априори известной [8]. Зеркальные одноцветовые температуры излучения рассчитывают исходя из сопряженных уравнений (7, 8 и 9, 10). Для исключения неизвестной T , вычтем из уравнений (7) и (8) соответственно уравнения (9) и (10)

$$\frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda_1}{C_2} \ln \varepsilon_1 - \frac{1}{T} + \frac{\lambda_2}{C_2} \ln \varepsilon_1 = \frac{\ln \varepsilon_1}{C_2} (\lambda_2 - \lambda_1); \quad (12)$$

$$\frac{1}{S_2} - \frac{1}{S_1} = \frac{1}{T} - \frac{\lambda_2}{C_2} \ln \varepsilon_2 - \frac{1}{T} + \frac{\lambda_1}{C_2} \ln \varepsilon_2 = \frac{\ln \varepsilon_2}{C_2} (\lambda_1 - \lambda_2). \quad (13)$$

Решаем уравнение (12) относительно S_2' :

$$\frac{S_2' - S_1}{S_1 S_2'} = \frac{\ln \varepsilon_1 (\lambda_2 - \lambda_1)}{C_2};$$

$$S_1 S_2' \ln \varepsilon_1 (\lambda_2 - \lambda_1) = C_2 (S_2' - S_1);$$

$$S_1 S_2' \ln \varepsilon_1 (\lambda_2 - \lambda_1) - C_2 S_2' = -C_2 S_1;$$

$$S_2' (S_1 \ln \varepsilon_1 (\lambda_2 - \lambda_1) - C_2) = -C_2 S_1.$$

$$S_2' = \frac{-S_1 C_2}{S_1 \ln \varepsilon_1 (\lambda_2 - \lambda_1) - C_2}. \quad (14)$$

Аналогично из уравнения (13) находим S_1'

$$\frac{S_1' - S_2}{S_2 S_1'} = \frac{-\ln \varepsilon_2 (\lambda_2 - \lambda_1)}{C_2};$$

$$-S_2 S_1' \ln \varepsilon_2 (\lambda_2 - \lambda_1) = C_2 (S_1' - S_2);$$

$$-S_2 S_1' \ln \varepsilon_2 (\lambda_2 - \lambda_1) - C_2 S_1' = -C_2 S_2;$$

$$S_1' (-S_2 \ln \varepsilon_2 (\lambda_2 - \lambda_1) - C_2) = -C_2 S_2.$$

$$S_1' = \frac{S_2 C_2}{S_2 \ln \varepsilon_2 (\lambda_2 - \lambda_1) + C_2}. \quad (15)$$

Полученные выражения для S_1' и S_2' обеспечивают расчет $S_{2Ц}'$.

Расчётные формулы и значения относительных инструментальных погрешностей ДКПИ ($\delta T_{\text{ДКПИ}}$), а также спектрального отношения (δT_{CO}) пирометрии излучения приведены в табл. 3. Для сравнения полученных результатов из δT_{CO} также исключена обусловленная селективностью излучения методическая составляющая

$$T_{\text{CO}} = \frac{1}{\frac{1}{S_{2Ц}} + \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{C_2} \ln(\varepsilon_{\text{ЭКВ}})}. \quad (16)$$

Приведенные в табл. 3 результаты сравнительных исследований инструментальных погрешностей показывают явные преимущества ДКПИ по сравнению с классической спектрального отношения пирометрией излучения. При одинаковых знаках δ_{S_1} и δ_{S_2} инструментальные погрешности классической пирометрии (0,19-0,97 %) на 0,03-0,11 % ниже погрешностей двухцветовой компенсационной термометрии (0,22-1,08 %). Причем это отличие увеличивается в указанных диапазонах с ростом модулей погрешностей измерений одноцветовых температур от 0,2 до 1,0 %. Равные по модулю и одинаковые по знаку δ_{S_1} , δ_{S_2} соответствуют различным изменениям излучательной способности на рабочих волнах, так как $\lambda_2 > \lambda_1$. Это, в свою очередь, соответственно изменяет значения $\varepsilon_{\text{ЭКВ}} = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$ и, следовательно,

Таблица 3. Инструментальные погрешности ДКПИ и спектрального отношения пирометрии излучения вольфрама при $T = 1600 \text{ K}$; $\lambda_1 = 0,7$; $\lambda_2 = 0,9 \text{ мкм}$

Погрешности измерений одноцветовых температур		Погрешности ДКПИ, $\delta T_{\text{ДКПИ}} = \frac{T_{\text{ДКПИ}} - T}{T} 100, \%$	Погрешности спектрального отношения пирометрии излучения, $\delta T_{\text{CO}} = \frac{T_{\text{CO}} - T}{T} 100, \%$
$\delta_{S_1}, \%$	$\delta_{S_2}, \%$		
0,2	0,2	0,220	0,190
0,2	-0,2	-0,003	1,750
-0,2	0,2	0,002	-1,690
-0,2	-0,2	-0,220	-0,190
0,5	0,5	0,540	0,480
0,5	-0,5	-0,010	4,500
-0,5	0,5	0,004	-4,13
-0,5	-0,5	-0,540	-0,480
1,0	1,0	1,080	0,970
1,0	-1,0	-0,020	9,410
-1,0	1,0	0,003	-7,940
-1,0	-1,0	-1,080	-0,970

T_{CO} и δT_{CO} . При разных знаках погрешностей измерений одноцветовых температур излучения влияние рассмотренного фактора на $\varepsilon_{\text{экв}} = \varepsilon_1/\varepsilon_2, T_{\text{CO}}$ и δT_{CO} значительно усиливается и δT_{CO} находится в пределах от 1,7 до 9,4 %.

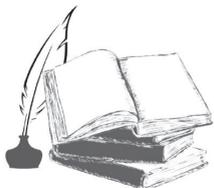
В аналогичных условиях инструментальные погрешности ДКПИ практически равны однознаковым погрешностям измерений одноцветовых температур излучения. При различных знаках и одинаковых модулях $\delta_{S_1}, \delta_{S_2}$ измеренные и зеркальные двухцветовые температуры излучения практически симметрично смещаются относительно температуры термометрируемого сплава, инструментальные погрешности ДКПИ становятся пренебрежительно малыми и находятся в пределах 0,002-0,020 %. При различных модулях погрешностей измерений одноцветовых температур излучения инструментальные погрешности ДКПИ будут занимать промежуточное значение между указанными минимальными и максимальными значениями. Установленное снижение инструментальных погрешностей является существенным преимуществом предложенной технологии в условиях металлургии, то есть в условиях изменяющейся излучательной способности металла и пропускания сопутствующей промежуточной среды. ДКПИ нечувствительна к характеру и нелинейности распределения излучательной способности термометрируемого сплава. Например, при спадающем и возрастающем распределениях излучательной способности реальное и зеркальное распределения меняются местами. Кроме того, данная технология может быть реализована на серийных пирометрах спектрального отношения.

Таким образом, установлено существенное влияние термометрических условий на инструментальные погрешности многоцветовой пирометрии излучения металлических сплавов. Для 3-х и 4-х рабочих волн инструментальные погрешности многоцветовой детерминированной термометрии в 5-17 и 20-150 раз выше погрешностей измерений одноцветовых температур излучения в спектральных диапазонах 0,5-1,4 и 0,5-0,8 мкм, соответственно.

Инструментальные погрешности классической двухцветовой, симметрично-волновой и двухцветовой компенсационной термометрии практически равны однозна-

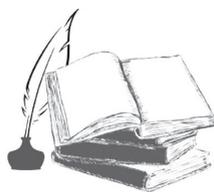
Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

ковым равным по модулям погрешностям измерений одноцветовых температур излучения. При разных знаках инструментальные погрешности классической двухцветовой и симметрично-волновой термометрии превышают погрешности измерений одноцветовых температур, как минимум, в 8 и 3 раза соответственно. В этом случае погрешности двухцветовой компенсационной термометрии наоборот, существенно уменьшаются, и при одинаковых модулях погрешностей измерений одноцветовых температур излучения, принимают пренебрежимо малые значения. В отличие от симметрично-волновой термометрии, предложенная технология не чувствительна к характеру спектральных распределений излучательной способности термометрируемых сплавов. Эти преимущества двухцветовой компенсационной пирометрии излучения расширяют область применения оптической термометрии в условиях селективного изменения термометрических характеристик металлических сплавов.



Список литературы

1. Жуков Л. Ф. Исследование и разработка методов и средств температурного контроля и ресурсосберегающих технологических процессов получения жидкого чугуна в литейном производстве: дис. доктора техн. наук: 05.11.04, 05.16.04. – К., 1992. – 505 с.
2. Жуков Л. Ф., Петренко Д. А., Корниенко А. Л. История, состояние и перспективы развития температурных измерений в металлургии // Металл и литье Украины. – 2012. – № 7. – С. 27-34.
3. Крутиков В. Н., Фрунзе А. В. О прослеживаемости современных пирометров к первичному эталону единицы температуры и классификации методов пирометрии // Измерительная техника. – 2012. – № 2.
4. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л., Богдан А. В., Крупник В. М., Крупник Л. В., Писаренко В. Г., Костановский В. В. Инновационные технологии многоцветовой термометрии. Вимірювальна техніка та метрологія. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2012. – № 73. – С. 45-51.
5. Снопко В. Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения – Минск: Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 1999. – 224 с.
6. Корниенко А. Л., Жуков Л. Ф. Исследование инструментальных погрешностей многоцветовой симметрично-волновой термометрии металлических сплавов. – Вісник національного університету «Львівська політехніка», «Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація». – 2014. – № 795. – С. 7-16.
7. Киренков И. И. Метрологические основы оптической пирометрии. – Москва: Издательство стандартов. – 1976. – 140 с.
8. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник / Под ред. А. Е. Шейндлина. – Москва: Энергия. – 1974.



References

1. Zhukov L. F. (1992). Issledovanie i razrabotka metodov i sredstv temperaturnogo kontrolya i resursosberegaiushihkh tekhnologicheskikh protsessov polucheniiia zhidkogo chuguna v liteinom proizvodstve. [Research and development of methods and means of temperature control and resource-saving technological processes of liquid iron in the foundry industry]. Doctor's thesis: 05.11.04, 05.16.04, Kiev, 505 p. [in Russian].
2. Zhukov L. F, Petrenko D. A., Kornienko A. L. (2012). Istoriia, sostoianie i perspektivy razvitiia temperaturnykh izmerenii v metallurgii. [History, current state and prospects of development of the temperature measurement in industry]. Metall i lite Ukrainy, № 7, pp. 27-34. [in Russian].

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

3. Krutikov V. N., Frunze A. V. (2012). O proslezhivaemosti sovremennykh pirometrov k pervichnomu etalonu edinitsy temperatury i klassifikatsii metodov pirometrii. [*About traceability modern pyrometers to the primary unit of temperature and the standard classification methods pyrometry*]. Izmeritelnaia tekhnika, № 2. [in Russian].
4. Zhukov L. F., Kornienko A. L., Bogdan A. V., Krupnik V. M., Krupnik L. V., Pisarenko V. G., Kostanovskii V. V. (2012). Innovatsionnye tehnologii mnogotsvetovoi termometrii. [*Innovative technologies Multi thermometry*]. Vimiriuvalna tekhnika ta metrologiia. Mizhvidomchii naukoivo-tehnichnii zbirnik, № 73, pp. 45-51. [in Russian].
5. Snopko V. N. (1999). Osnovy metodov pirometrii po spektru teplovogo izlucheniia. [*Basics pyrometry methods of the spectrum of thermal radiation*]. Minsk: In-t fiziki named by B. I. Stepanova NAN Belarusi, 224 p. [in Russian].
6. Kornienko A. L., Zhukov L. F. (2014). Issledovanie instrumentalnykh pogreshnostei mnogotsvetovoi simmetrichno-volnovoi termometrii metallicheskikh splavov. [*Research instrument errors multicolor symmetrical wave thermometry metal alloys*]. Lvivska politekhnika, Teploenergetika. Inzheneriia dovkillia. Avtomatizaciia, № 795, pp. 7-16. [in Russian].
7. Kirenkov I. I. (1976). Metrologicheskie osnovy opticheskoi pirometrii. [*Metrological basics of optical pyrometry*]. Moscow: Izdatelstvo standartov, 140 p. [in Russian].
8. Izluchatelnye svoistva tverdykh materialov. [*The radiative properties of solid materials*]. Spravochnik ed. by A. E. Sheindlina. Moscow: Energiia, 1974. [in Russian].

Поступила 09.08.2016

К сведению читателей

и подписчиков!

Телефон редакции

журнала «Процессы литья»:

(044) 424-04-10