
ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 536.521.3

Л. Ф. Жуков, Д. А. Петренко

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ДВУХЦВЕТОВОЙ КОМПЕНСАЦИОННОЙ ТЕРМОМЕТРИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Установлены значительно более высокие метрологические характеристики двухцветовой компенсационной термометрии по сравнению с классической энергетической и спектрального отношения пирометрией излучения. В наиболее реальных условиях изменений селективности излучения металлических сплавов методические погрешности предложенного метода ниже погрешностей энергетической на λ_1 , λ_2 и спектрального отношения пирометрии излучения соответственно в 4,3-5,8; 6,3-7,8 и 42,8-51,8 раз. В условиях изменения среднего уровня излучательной способности при постоянной селективности погрешности двухцветовой компенсационной термометрии принимают промежуточное значение относительно погрешностей энергетической пирометрии излучения.

Ключевые слова: оптические характеристики металлических сплавов, двухцветовая компенсационная, энергетическая (одноцветовая) и спектрального отношения пирометрией излучения, методическая погрешность, средний уровень излучательной способности, коэффициент селективности излучения.

Встановлено значно вищі метрологічні характеристики двокольорової компенсаційної термометрії у порівнянні з класичною енергетичною і спектрального відношення пірометрією випромінення. В найбільш реальних умовах змін селективності випромінення металевих сплавів методичні похибки запропонованого методу нижчі за похибки енергетичної на λ_1 , λ_2 та спектрального відношення пірометрії випромінення відповідно в 4,3-5,8; 6,3-7,8 та 42,8-51,8 рази. В умовах змінного середнього рівня випромінювальної здатності при постійній селективності похибки двокольорової компенсаційної термометрії характеризуються проміжним значенням відносно похибок енергетичної пірометрії випромінення.

Ключові слова: оптичні характеристики металевих сплавів, двокольорова компенсаційна, енергетична (однокольорова) і спектрального відношення пірометрія випромінення, методична похибка, середній рівень випромінювальної здатності, коефіцієнт селективності випромінення.

Significantly higher metrological characteristics of two-colour compensating thermometry in comparison with classical energy and spectral ratio pyrometry were determined. Under the most real conditions of emission selectivity changes of metal alloys methodical errors of proposed method are lower than errors of classical energy on λ_1 , λ_2 and spectral ratio pyrometry in 4.3-5.8; 6.3-7.8 and 42.8-51.8 times respectively. Under conditions of changes of average level of emissivity and constant selectivity errors of two-colour compensating thermometry lie between errors of energy pyrometry.

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

Keywords: optical properties of metal alloys, two-colour compensating, energy (one-colour) and spectral ratio pyrometry, methodical error, average level of emissivity, coefficient of selectivity of emission.

Двухцветовая компенсационная пирометрия излучения (ДКПИ) удачно сочетает преимущества классической и многоцветовой термометрии соответственно по инструментальным и методическим погрешностям [1]. В этой работе доказано, что инструментальные погрешности ДКПИ, в зависимости от модулей и знаков погрешностей измерений исходных одноцветовых температур ($\Delta S_1, \Delta S_2$), практически не превышают значения $\Delta S_1, \Delta S_2$ или становятся пренебрежимо малыми. Поэтому, для практики особый интерес представляют исследования методических погрешностей ДКПИ в сравнении с известными классическими энергетическими и спектрального отношения методами оптической термометрии.

Методические погрешности пирометрии излучения определяются оптическими характеристиками металлических сплавов и ДКПИ. Каждая технология пирометрии излучения характеризуется своим комплексом оптических характеристик. Авторами выполнена классификация оптических характеристик металлических сплавов с позиций ДКПИ (таблица).

Оптические характеристики металлических сплавов

Физические модели излучения сплавов	Качественные			Количественные	
	спектральные распределения, ε	математические описания распределений, ε	обозначения распределений, ε	коэффициент селективности излучения, $k = \frac{\varepsilon_{\lambda 1}}{\varepsilon_{\lambda 2}}$	средний уровень, ε , $\varepsilon_{cp} = \frac{\varepsilon_{\lambda 1} + \varepsilon_{\lambda 2}}{2}$
Абсолютно черные	термодинамически равновесные	$\varepsilon_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 2} = 1$	ТР	$k = 1$	ε_{cp}
Серые	серые	$\varepsilon_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 2} = \text{const} < 1$	СР	$k = 1$	$\varepsilon_{cp} = \varepsilon_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 2} < 1$
Окрашенные	спадающие	$1 \geq \varepsilon_{\lambda 1} > \varepsilon_{\lambda 2}$ реальные	С	$k > 1$	$0 < \varepsilon_{cp} < 1$
		$\varepsilon_{\lambda 1} < \varepsilon_{\lambda 2} \leq 1$ зеркальные		$k < 1$	
	возрастающие	$\varepsilon_{\lambda 1} < \varepsilon_{\lambda 2} \leq 1$ реальные	В	$k < 1$	$0 < \varepsilon_{cp} < 1$
		$1 \geq \varepsilon_{\lambda 1} > \varepsilon_{\lambda 2}$ зеркальные		$k > 1$	

Сплавы определяются приведенными качественными и количественными характеристиками. В условиях световодной и бесконтактной термометрии сплавы представляют абсолютно черные, серые и окрашенные излучатели с термодинамически равновесными, серыми, а также окрашенными, спадающими и возрастающими распределениями излучательной способности (ε). Количественно спектральные распределения характеризуются коэффициентом селективности

излучения $k = \frac{\varepsilon_{\lambda 1}}{\varepsilon_{\lambda 2}}$ и средним уровнем излучательной способности $\varepsilon_{cp} = \frac{\varepsilon_{\lambda 1} + \varepsilon_{\lambda 2}}{2}$.

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

Причем, для реальных и зеркальных спадающих и возрастающих распределений излучательной способности их математические описания и коэффициенты селективности отличаются соответственно качественно и количественно.

Оптические характеристики ДКПИ включают одинаковые для реальных и зеркальных распределений излучательной способности металлических сплавов длины рабочих волн λ_1 и λ_2 , которые, в свою очередь, определяют эквивалентную

$$\text{длину волны } \lambda_{\text{ЭКВ}} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}, \text{ а также } \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1.$$

Температура металла является определяющим параметром, комплексно влияющем на его указанные оптические характеристики. Например, в зависимости от соотношения температур расплава и термодинамического равновесия основной металлургической реакции его поверхность может быть покрыта оксидными пленками с серым характером излучения или является чистой с окрашенным спадающим или возрастающим распределением ε . Поэтому, гипотетический интерес представляют исследования влияния температуры сплава, при различном среднем уровне его излучательной способности и неизменной селективности, на методические погрешности ДКПИ и классической оптической термометрии.

На рис. 1 представлены зависимости методических погрешностей классической и двухцветовой компенсационной пирометрии излучения от температуры металла при среднем и граничных значениях $\varepsilon_{\text{ср}}$.

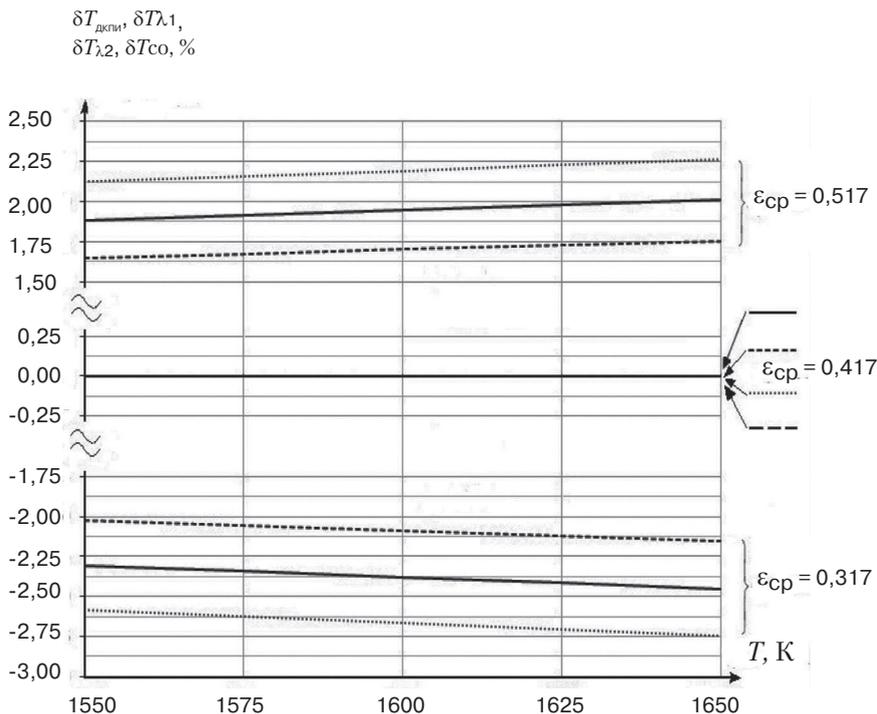


Рис. 1. Влияние температуры на методические погрешности пирометрии излучения при $\varepsilon_{\text{ср}} = \text{var} = 0,317-0,517$ и $k = \text{const} = 1,093$: — двухцветовой компенсационной; - - - одноцветовой на $\lambda_1 = 0,7$ мкм; одноцветовой на $\lambda_2 = 0,9$ мкм; — — спектрального отношения на $\lambda_{\text{ЭКВ}} = 3,15$ мкм

В качестве базового термометрируемого объекта выбран хорошо изученный в оптике металлов и оптической термометрии вольфрам с наиболее полно табулированными характеристиками [2]. Вольфрам наилучшим образом представляет оптические характеристики самых распространенных

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

в металлургии железоуглеродистых сплавов. Для вольфрама с $T = 1600$ К (средняя точка исследуемого температурного диапазона), $\varepsilon_{\lambda 1}^H = 0,436$, $\varepsilon_{\lambda 2}^H = 0,399$, $\varepsilon_{cp}^H = \frac{\varepsilon_{\lambda 1}^H + \varepsilon_{\lambda 2}^H}{2} = 0,417$ и $k^H = \frac{\varepsilon_{\lambda 1}^H}{\varepsilon_{\lambda 2}^H} = 1,093$ введены температурные поправки на методи-

ческие погрешности исследуемой двухцветовой компенсационной, а также классической энергетической и спектрального отношения пирометрии излучения. Указанные количественные характеристики введены в математические модели классической и двухцветовой компенсационной пирометрии излучения в качестве настроечных. Методические погрешности для вольфрама за счет изменений ε_{cp} и k в узком температурном диапазоне 1550-1650 К не превышают соответственно 0,03 и 0,01 %. Для сравнительных исследований метрологических характеристик двухцветовой компенсационной и классической пирометрии излучения указанные методические погрешности не значимы и мы ими пренебрегаем. Следовательно, мы предполагаем, что для вольфрама $\varepsilon_{cp} = \text{const} = 0,417$ и $k = \text{const} = 1,093$ во всем температурном диапазоне. При адаптации бесконтактного термоконтроля на металлургических печах и агрегатах определяются зоны визирования доступной поверхности расплава с отклонениями среднего уровня излучательной способности от настроечного, не превышающими 0,1, то есть $\varepsilon_{cp} = \varepsilon_{cp}^H \pm 0,1$ [3, 4]. Такие же пределы изменений ε_{cp} были выбраны для наших температурных исследований.

После введения температурных поправок, когда $\varepsilon_{cp} = \varepsilon_{cp}^H$, температурные зависимости для всех методов совпадают на нулевом уровне методических погрешностей. Погрешности пирометрии спектрального отношения определяются выражением:

$$\delta T_{CO} = \frac{S_{2цк} - T}{T} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{S_{2цк}} + \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{C_2} \ln(k^H)} - T}{T} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{T} + \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{C_2} \ln(\frac{k^H}{k})} - T}{T}, \quad (1)$$

где $S_{2цк}$ – измеренная двухцветовая температура излучения; $S_{2цк}$ – двухцветовая температура излучения с коррекцией на k^H ; T – температура термометрируемого сплава; $C_2 = 0,014388$ К·м – вторая постоянная Планка.

После упрощений выражение (1) можно представить в виде:

$$\delta T_{CO} = - \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}} \ln(\frac{k^H}{k})}{\lambda_{\text{ЭКВ}} \ln(\frac{k^H}{k}) + \frac{C_2}{T}}. \quad (2)$$

Полученное с использованием термодинамических законов теплового излучения выражение (2) показывает влияние температуры на методические погрешности при неизменных оптических характеристиках пирометрической системы ($\lambda_{\text{ЭКВ}} = \text{const}$). Также из (2) видно сильное влияние коэффициента селективности излучения на δT_{CO} . При принятых условиях температурные погрешности пирометрии спектрального отношения для $\varepsilon_{cp} = 0,317$ и $\varepsilon_{cp} = 0,517$ также равны нулю, так как они определяются коэффициентом селективности, который не изменяется и равен настроечному.

Погрешности одноцветовой термометрии на λ_n представляются выражением:

$$\delta T_{\lambda n} = \frac{S_{n\text{к}} - T}{T} = \frac{\frac{1}{S_n + \frac{\lambda_n}{C_2} \ln(\varepsilon_{\lambda n})} - T}{T} = \frac{\frac{1}{T - \frac{\lambda_n}{C_2} \ln(\varepsilon_{\lambda n}) + \frac{\lambda_n}{C_2} \ln(\varepsilon_{\lambda n}^H)} - T}{T} =$$

$$= \frac{\frac{1}{T + \frac{\lambda_n}{C_2} \ln(\frac{\varepsilon_{\lambda n}^H}{\varepsilon_{\lambda n}})} - T}{T}, \quad (3)$$

где $S_{n\text{к}}$ – одноцветовая температура излучения с коррекцией на $\varepsilon_{\lambda n}^H$; S_n – измеренная одноцветовая температура излучения.

После упрощений получим

$$\delta T_{\lambda n} = - \frac{\lambda_n \ln(\frac{\varepsilon_{\lambda n}^H}{\varepsilon_{\lambda n}})}{\lambda_n \ln(\frac{\varepsilon_{\lambda n}^H}{\varepsilon_{\lambda n}}) + \frac{C_2}{T}}. \quad (4)$$

Из (4) видна и количественно определяется зависимость методических погрешностей от T при заданных λ_n и $\varepsilon_{\lambda n}^H$. Также отсюда следует значительное влияние на погрешности длины рабочей волны λ_n пирометрической системы.

С повышением температуры металла методические погрешности классической энергетической пирометрии излучения возрастают. Температурные зависимости, при граничных значения $\varepsilon_{\text{ср}}^{\text{min}} = 0,317$ и $\varepsilon_{\text{ср}}^{\text{max}} = 0,517$, имеют одинаковую крутизну и возрастают пропорционально модулям погрешностей, для которых выполняется соотношение $|\delta T_{\lambda 2}| > |\delta T_{\lambda 1}|$. Так, в исследованном температурном диапазоне

максимальные приросты $|\delta T_{\lambda 2}|$ и $|\delta T_{\lambda 1}|$ соответственно составляют 0,16 и 0,13 %.

При этом исходные (при $T = 1550$ К) модули погрешностей достигают 2,59 и 2,02 %, соответственно.

Погрешности ДКПИ по модулю занимают промежуточное положение между погрешностями классической энергетической пирометрии излучения на λ_1 и λ_2 и достигают 2,31 % (при $T = 1550$ К) при приросте за счет температуры 0,14 %. Это объясняется тем, что для расчета зеркальных одноцветовых температур излучения используются значения настроечных излучательных способностей $\varepsilon_{\lambda 1}^H$ и $\varepsilon_{\lambda 2}^H$. Такой расчет эквивалентен коррекции S_1 и S_2 на $\varepsilon_{\lambda 1}^H$ и $\varepsilon_{\lambda 2}^H$ с последующим усреднением полученных результатов. Зависимость методических погрешностей ДКПИ от параметров термометрируемого сплава ($T, \varepsilon_{\lambda 1}, \varepsilon_{\lambda 2}$), а также настроечных $\varepsilon_{\lambda 1}^H, \varepsilon_{\lambda 2}^H$ определяется выражением:

$$\delta T_{\text{ДКПИ}} = \frac{T\{2C_2(\lambda_1\lambda_2 - \lambda_1\lambda_{\text{ЭКВ}} + \lambda_1\lambda_{\text{ЭКВ}}) + T[\lambda_1\lambda_2\lambda_{\text{ЭКВ}}(\ln \varepsilon_{\lambda 1} - \ln \varepsilon_{\lambda 2}) - \lambda_{\text{ЭКВ}}(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 \ln \varepsilon_{\lambda 2}^H + \lambda_1 \ln \varepsilon_{\lambda 1}^H) + \lambda_2^2 \lambda_{\text{ЭКВ}} \ln \varepsilon_{\lambda 2} - \lambda_1^2 \lambda_{\text{ЭКВ}} \ln \varepsilon_{\lambda 1}]\}}{2C_2(\lambda_2\lambda_{\text{ЭКВ}} - \lambda_1\lambda_{\text{ЭКВ}}) + T[\lambda_1\lambda_2\lambda_{\text{ЭКВ}}(\ln \varepsilon_{\lambda 2} - \ln \varepsilon_{\lambda 1}) + \lambda_{\text{ЭКВ}}(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_2 \ln \varepsilon_{\lambda 2}^H + \lambda_1 \ln \varepsilon_{\lambda 1}^H) - \lambda_2^2 \lambda_{\text{ЭКВ}} \ln \varepsilon_{\lambda 2} + \lambda_1^2 \lambda_{\text{ЭКВ}} \ln \varepsilon_{\lambda 1}]} \quad (5)$$

Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

В производственных условиях под воздействием, например, оксидных плен, спектральное распределение ϵ металлического расплава изменяется от окрашенного спадающего для чистой поверхности, через серое до возрастающего, для тонких и определенной толщины непрозрачных оксидных плен. Аналогичное качественное и количественное изменение селективности излучения имеет место под воздействием насыщения металла неметаллическими включениями и времени его выдержки. Поэтому, особый интерес для практики представляет изучение влияния температуры при различной селективности излучения. На рис. 2 представлены полученные зависимости методических погрешностей двухцветовой компенсационной и классической пирометрии излучения от температуры при изменяющемся в широких пределах коэффициенте селективности излучения ($k = \text{var} = 1,000-1,186$) и постоянном, соответствующем вольфраму с $T=1600$ К, среднем уровне излучательной способности $\epsilon_{\text{ср}} = \text{const} = 0,417$.

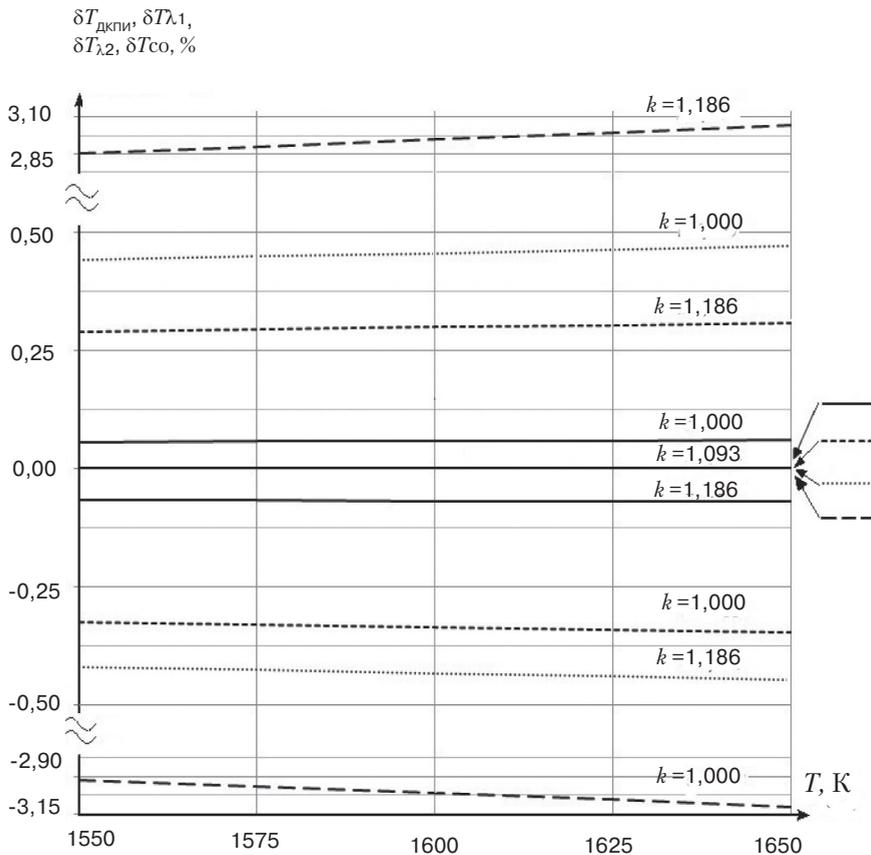


Рис. 2. Влияние температуры на методические погрешности пирометрии излучения при $\epsilon_{\text{ср}} = \text{const} = 0,417$ и $k = \text{var} = 1,000-1,186$: — двухцветовой компенсационной; - - - одноцветовой на $\lambda_1 = 0,7$ мкм; ······, одноцветовой на $\lambda_2 = 0,9$ мкм; — — — спектрального отношения на $\lambda_{\text{экрв}} = 3,15$ мкм

По физическому смыслу k не может быть менее 1 для спадающего (реального) распределения излучательной способности вольфрама. Верхний предел для k выбран симметрично относительно его настроечного значения. Такие пределы изменения коэффициента селективности излучения отражают наиболее реальное поведение излучательной способности металлических сплавов в металлургии [3].

Для обеспечения сравнительных исследований методов в одинаковых условиях,

температурная поправка вводилась по описанной выше методике. После введения температурной поправки для $k = k^H = 1,093$ методические погрешности классической пирометрии излучения и двухцветовой компенсационной равны нулю при любой температуре металла.

С повышением температуры методические погрешности классической и двухцветовой компенсационной пирометрии излучения возрастают. Причем наиболее сильная температурная зависимость, при граничных значениях $k_{\min} = 1,000$ и $k_{\max} = 1,186$, имеет место для пирометрии спектрального отношения, уменьшается для одноцветовой и минимальна для ДКПИ. Например, в исследованном температурном диапазоне $|\delta T_{\text{CO}}|$, $|\delta T_{\lambda_2}|$, $|\delta T_{\lambda_1}|$ и $|\delta T_{\text{ДКПИ}}|$ соответственно возрастают на 0,19, 0,03, 0,02 и 0,004 %, при исходных абсолютных значениях (при $T=1550 \text{ К}$) 2,92, 0,44, 0,33 и 0,07 %. Полученные результаты объясняются анализом выражений для методических погрешностей классической и двухцветовой компенсационной пирометрии излучения (2, 4, 5). Например, вследствие того, что

$$\left| \lambda_{\text{ЭКВ}} \ln\left(\frac{k^H}{k}\right) \right| > \left| \lambda_2 \ln\left(\frac{\varepsilon_{\lambda_2}^H}{\varepsilon_{\lambda_2}}\right) \right| > \left| \lambda_1 \ln\left(\frac{\varepsilon_{\lambda_1}^H}{\varepsilon_{\lambda_1}}\right) \right|$$
 погрешности пирометрии излучения

спектрального отношения существенно превышают погрешности одноцветовой термометрии. Используемый в ДКПИ принцип компенсации [1] обеспечивает минимальную зависимость методических погрешностей от температуры при минимальных их модулях для граничных k .

Таким образом, в результате сравнительных исследований установлены значительно более высокие метрологические характеристики ДКПИ по сравнению с классической энергетической и спектрального отношения пирометрией излучения. В наиболее реальных условиях изменений селективности излучения металлических сплавов методические погрешности двухцветовой компенсационной термометрии ниже погрешностей энергетической на λ_1, λ_2 и спектрального отношения пирометрии излучения соответственно в 4,3-5,8; 6,3-7,8 и 42,8-51,8 раз. В гипотетических условиях изменения среднего уровня излучательной способности при постоянной селективности погрешности ДКПИ занимают промежуточное положение между погрешностями энергетической пирометрии излучения на λ_1, λ_2 .



Список литературы

1. Жуков Л. Ф., Петренко Д. А., Корниенко А. Л. Двухцветовая компенсационная термометрия металлических сплавов и ее инструментальные погрешности // Процессы литья. – 2016. – № 5. – С. 48-58.
2. Шейндлин А. Е. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник // Под ред. А. Е. Шейндлина. – М: Энергия, 1974.
3. Исследование и разработка методов и средств температурного контроля и ресурсосберегающих технологических процессов получения жидкого чугуна в литейном производстве // Жуков Л. Ф. Дис. доктора техн. наук: 05.11.04, 05.16.04. – К., 1992. – 505 с.
4. Автоматический контроль температуры жидкого чугуна в литейном производстве // Е. Г. Чугунный, Л. Ф. Жуков. – К.: Наукова думка, 1978. – 175 с.



References

1. Zhukov L. F., Petrenko D. O., Kornienko A. L. (2016). Dvuhtsvetovaya kompensatsionnaya termometriya metallicheskih splavov i yoyo instrumentalnyie pogreshnosti. [*Two-colour compensating thermometry of metal alloys and its instrumental errors*]. Protseissy litya, №5, p.48-58. [in Russian].
2. Sheindlin A. E. (1974). Izluchatelnyie svoystva tverdyih materialov. [*Radiative properties of solid materials*]: Spravochnik, Mosow: Energia. [in Russian].
3. Zhukov L. F. (1992). Issledovanie i razrabotka metodov i sredstv temperaturnogo kontrolya i resursosberegayuschih tehnologicheskikh protsessov polucheniya zhidkogo chuguna v liteynom proizvodstve. [*Investigation and development of methods and means of temperature control and resource-saving technological processes of liquid cast-iron obtaining in foundry production*]. Dissertation of doctor of technical scienses: 05.11.04, 05.16.04, Kiev, 505 p. [in Russian].
4. Zhukov L. F., Chugunnyiy E. G. (1978). Avtomaticheskii kontrol temperatury zhidkogo chuguna v liteynom proizvodstve. [*Automotive control of liquid cast-iron temperature in foundry production*]. Kiev: Naukova dumka, 175 p. [in Russian].

Поступила 18.10.2016

Вниманию авторов!

Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь название статьи, ФИО авторов, аннотации, ключевые слова на русском, украинском и английском языках, а также список литературы на английском языке, согласно международным требованиям. Объем статьи – не более **10 стр.**, рисунков – не более **5**.

Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть чёрно-белыми, четкими и контрастными.

Статьи в редакции проходят научное рецензирование.