

УДК 536.521.3

ВЛИЯНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИХ КЛАССИЧЕСКОЙ И ДВУХЦВЕТОВОЙ КОМПЕНСАЦИОННОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

Жуков Л.Ф., д. т. н., Петренко Д.А.

*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,
бульв. Вернадского, 34/1, 03142, Киев, Украина*

Встановлено значно вищі метрологічні характеристики, у порівнянні з відомими рішеннями, запропонованого метода двокольорової компенсаційної пірометрії випромінювання металевих сплавів із випадково змінною селективністю випромінювання. Методичні похибки нового методу нижчі, ніж похибки енергетичної однокольорової, а також спектрального відношення пірометрії випромінювання в 4,4...6,2 і 40,2 рази, відповідно.

Представлено результати енергетично встановлених значительно более высокие метрологические характеристики, по сравнению с известными решениями, предложенного метода двухцветовой компенсационной пирометрии излучения металлических сплавов со случайно изменяющейся селективностью излучения. Методические погрешности нового метода ниже погрешностей энергетической одноцветовой, а также спектрального отношения пирометрии излучения в 4,4...6,2 и 40,2 раза, соответственно.

Much higher metrological characteristics, in comparison with known solutions, of proposed two-colour compensating thermometry method of metal alloys with randomly variable selectivity of radiation were determined. Methodical errors of two-colour compensating thermometry are lower than errors of energy one-colour and spectral ratio pyrometry in 4,4...6,2 and 40,2 times, respectively.

Библ. 3, рис. 2.

Ключевые слова: температура, металлические сплавы, двухцветовая компенсационная, энергетическая одноцветовая и спектрального отношения пирометрия излучения, коэффициент селективности излучения, относительная методическая погрешность.

В результате выполненных в работе [1] исследований и анализа обосновано также ожидаемое влияние оптических характеристик термометрируемых объектов на методические погрешности двухцветовой компенсационной и классической пирометрии излучения. В значительной мере это относится к селективности излучения термометрируемых объектов и, прежде всего, металлических сплавов. Излучательные характеристики металлов и их сплавов, в отличие, например, от их оксидов, боридов, карбидов, нитридов и силицидов в производственных условиях случайно изменяются в более широких пределах. В инертной среде и вакууме, в соответствии с законами классической электродинамики, интенсивность и спектральное распределение теплового излучения сплавов определяются их электромагнитными характеристиками, которые, в свою очередь, зависят от примесей и неметаллических включений. В наиболее характерной для металлургии обычной атмосфере, диапазон случайных изменений селективности определяется доминирующим воздействием оксидных плен, которое, в свою очередь, зависит от интенсивности и направления окислительно-восстановительных процессов. Количественно селективность излучения можно оценить соответствующим коэффициентом $k = \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}$, равным отношению значений излучательной способности на рабочих волнах λ_1 и λ_2 . Для спадающих и воз-

растающих распределений излучательной способности коэффициент селективности соответственно больше и меньше единицы. Под воздействием интерференции излучения на покрывающих металл тонких прозрачных оксидных пленках коэффициент селективности может изменяться в широких пределах, при относительно стабильном среднем уровне излучательной способности. Обычно это имеет место для сплавов в струе или потоке, на выпуске или сливе, из металлургических печей и агрегатов.

В настоящей работе представлены результаты исследований, выполненных в диапазоне k от 1,000 до 1,186, существенно перекрывающем его реальные значения для наиболее распространенных в металлургии железоуглеродистых сплавов. При $k = 1$ излучение не селективно и является серым. Это имеет место, например, для сплавов, покрытых непрозрачными оксидными пленками. На рис. 1 пунктиром представлены исследованные спектральные распределения излучательной способности для граничных значений коэффициента селективности ($k_{\min} = 1,000$; $k_{\max} = 1,186$) при среднем уровне излучательной способности $\varepsilon_{\text{ср}} = \varepsilon_{\text{срн}} = 0,417$, соответствующем вольфраму в вакууме с $T = 1600$ К в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Сплошной линией показано спектральное распределение вольфрама с $k = k_{\text{н}} = 1,093$, выбранное в качестве

настроечного для исследуемых методов пирометрии излучения. Значения излучательной способности ε_{λ_1} и ε_{λ_2} введены в пирометрические уравнения для классической и двухцветовой компенсационной пирометрии излучения как настроечные параметры. Использованные характеристики вольфрама представительны для железоуглеродистых сплавов, детально изучены и табулированы в литературе по оптике металлов и оптической термометрии [2]. С целью исключения влияния излучательной способности и температуры на результаты

исследований, последние выполнены при $\varepsilon_{cp} = const$ и $T = const$.

Полученные в результате сравнительных исследований закономерности влияния селективности излучения сплавов на относительные методические погрешности двухцветовой компенсационной пирометрии излучения (ДКПИ) ($\delta T_{ДКПИ}$), а также классической энергетической одноцветовой на λ_1 и λ_2 (δT_{λ_1} и δT_{λ_2}) и спектрального отношения на $\lambda_{экв} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$ (δT_{CO}) термометрии приведены на рис. 2.

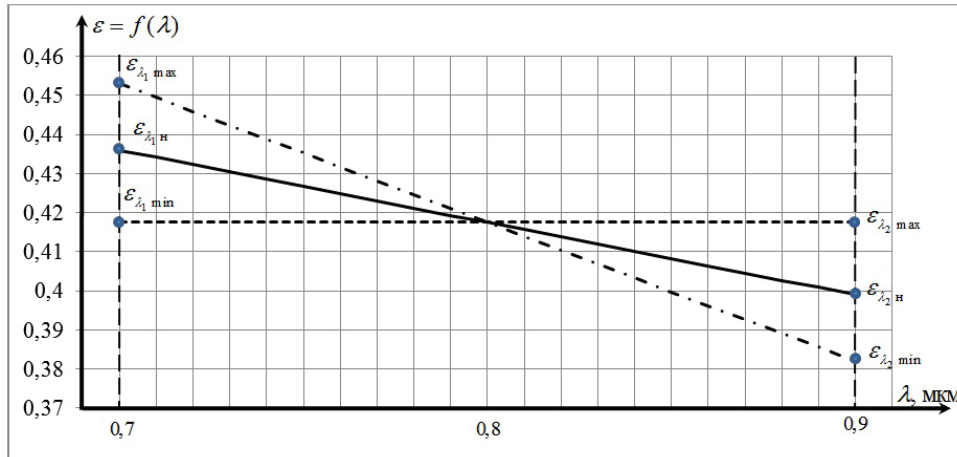


Рис. 1. Исследованные спектральные распределения излучательной способности металлических сплавов.

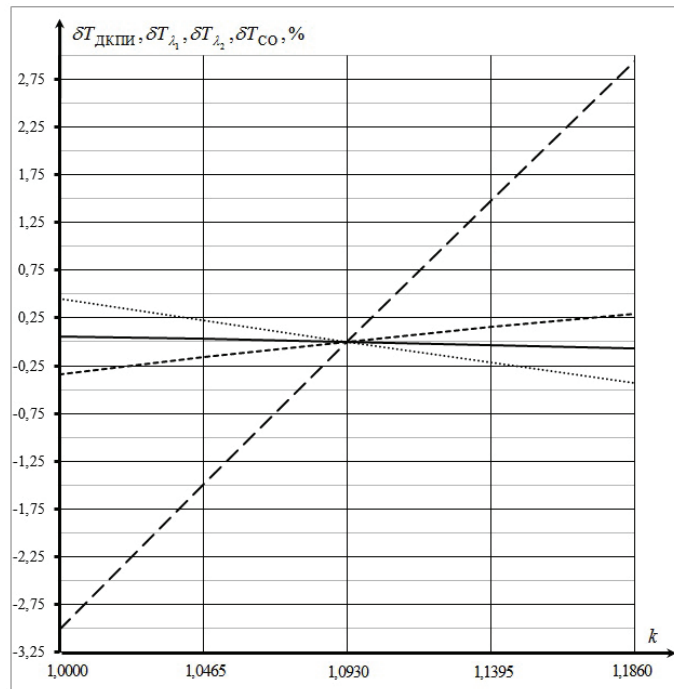


Рис. 2. Влияние селективности излучения металлических сплавов на относительные методические погрешности пирометрии излучения при $T = const = 1600\text{K}$ и $\varepsilon_{cp} = const = 0,417$:

- двухцветовой компенсационной на $\lambda_1 = 0,70\text{ мкм}$ и $\lambda_2 = 0,90\text{ мкм}$;
- - - - одноцветовой на $\lambda_1 = 0,70\text{ мкм}$;
- одноцветовой на $\lambda_2 = 0,90\text{ мкм}$;
- · - · спектрального отношения на $\lambda_{экв} = 3,15\text{ мкм}$.

Для настроечного значения коэффициента селективности излучения $k_n = 1,093$ введены температурные поправки на методические погрешности двухцветовой компенсационной, а также классической энергетической и спектрального отношения пирометрии излучения. Поэтому, при $k = k_n$ эти погрешности равны нулю.

По модулю погрешности двухцветовой компенсационной, одноцветовой и спектрального отношения пирометрии излучения располагаются в следующем порядке: $|\delta T_{\text{ДКПИ}}| < |\delta T_{\lambda_1}| < |\delta T_{\lambda_2}| < |\delta T_{\text{СО}}|$. Принцип компенсации обеспечивает минимальные погрешности ДКПИ. Погрешности нового метода ниже δT_{λ_1} и δT_{λ_2} , так как для определения зеркальных одноцветовых температур излучения используются настроечные значения излучательной способности $\epsilon_{\lambda_{1n}}$ и $\epsilon_{\lambda_{2n}}$, относительно которых отклоняются ϵ_{λ_1} и ϵ_{λ_2} при изменении коэффициента селективности. Причем величины этих отклонений равны по модулю и противоположны по знаку.

При увеличении k от 1,000 до 1,186 погрешность ДКПИ по модулю уменьшается от 0,058 до 0,000 % и затем повышается от 0,000 до 0,069 %. Полученная закономерность объясняется тем, что по условиям исследований введена температурная поправка, обнуляющая методическую погрешность при $k = k_n$. Кроме того, с изменением коэффициента селективности излучения от минимального до максимального соответствующие в реальных условиях незначительные изменения ϵ_{λ_1} и ϵ_{λ_2} вызывают «однозначные» и близкие по модулю погрешности ΔS_1^i и ΔS_2^i для зеркальных одноцветовых температур излучения. Отличие между ΔS_1^i и ΔS_2^i определяется влиянием длины волны λ_2 . Вследствие того, что расчет зеркальной одноцветовой температуры излучения S_1^i ведется с использованием измеренной одноцветовой температуры излучения S_2 , методическая погрешность которой превышает погрешность S_1 из-за влияния $\lambda_1 > \lambda_2$, имеет место соотношение $|\Delta S_1^i| > |\Delta S_2^i|$. С использованием выведенных из закона Вина пирометрических уравнений для зеркальных одно- и двухцветовых температур излучения [3] нами получены выражения (1-3) для абсолютных методических погрешностей ΔS_1^i , ΔS_2^i и $\Delta S_{2н}^i$. Погрешность ΔS_1^i для зеркальной одноцветовой температуры излучения на λ_1 определяется выражением

$$\Delta S_1^i = S_{1p}^i - S_1^i = \frac{S_2(T, \epsilon_{\lambda_2}) \cdot C_2}{S_2(T, \epsilon_{\lambda_2}) \cdot \ln(\epsilon_{\lambda_{2n}}) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) + C_2} - \frac{S_2(T, \epsilon_{\lambda_2}) \cdot C_2}{S_2(T, \epsilon_{\lambda_2}) \cdot \ln(\epsilon_{\lambda_2}) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) + C_2}, \quad (1)$$

где $C_2 = 0,014388 \text{ К} \cdot \text{м}$ – вторая постоянная Планка;
 S_{1p}^i – расчетная зеркальная одноцветовая температура излучения для $\epsilon_{\lambda_{1n}}$;
 S_1^i – правильная зеркальная одноцветовая температура излучения, которая соответствует ϵ_{λ_2} , отличному от $\epsilon_{\lambda_{2n}}$;
 S_2 – измеренная одноцветовая температура излучения на λ_2 .

Очевидно, что когда $\epsilon_{\lambda_2} = \epsilon_{\lambda_{2n}}$, то $\Delta S_1^i = 0$. Если $k < k_n$, то, как видно из рис. 1, $\epsilon_{\lambda_2} > \epsilon_{\lambda_{2n}}$. Отсюда следует, что знаменатель вычитаемого в (1) будет больше, чем знаменатель уменьшаемого, так как $|\ln(\epsilon_{\lambda_2})| > |\ln(\epsilon_{\lambda_{2n}})|$ и, следовательно, $\Delta S_1^i > 0$. Если $k > k_n$, то $\epsilon_{\lambda_2} < \epsilon_{\lambda_{2n}}$. В этом случае знаменатель вычитаемого в (1) будет меньше, чем знаменатель уменьшаемого, так как $|\ln(\epsilon_{\lambda_{2n}})| < |\ln(\epsilon_{\lambda_2})|$ и $\Delta S_1^i < 0$.

Выражение погрешности ΔS_1^i для зеркальной одноцветовой температуры излучения на λ_2 имеет аналогичный вид (2).

$$\Delta S_2^i = S_{2p}^i - S_2^i = \frac{-S_1(T, \epsilon_{\lambda_1}) \cdot C_2}{S_1(T, \epsilon_{\lambda_1}) \cdot \ln(\epsilon_{\lambda_{1n}}) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) - C_2} + \frac{S_1(T, \epsilon_{\lambda_1}) \cdot C_2}{S_1(T, \epsilon_{\lambda_1}) \cdot \ln(\epsilon_{\lambda_1}) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1) - C_2}, \quad (2)$$

где S_{2p}^i – расчетная зеркальная одноцветовая температура излучения для $\epsilon_{\lambda_{1n}}$;
 S_2^i – правильная зеркальная одноцветовая температура излучения, которая соответствует ϵ_{λ_1} , отличному от $\epsilon_{\lambda_{1n}}$;
 S_1 – измеренная одноцветовая температура излучения на λ_1 .

При $\epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_{1n}}$, $\Delta S_2^i = 0$. Если $k < k_n$, то $\epsilon_{\lambda_1} < \epsilon_{\lambda_{1n}}$ (рис. 1). Из этого видно, что знаменатель первого слагаемого в (2) будет меньше по модулю, чем знаменатель второго, так как $|\ln(\epsilon_{\lambda_{1n}})| < |\ln(\epsilon_{\lambda_1})|$. Первое слагаемое будет положительным и по модулю превысит второе (отрицательное), в результате чего $\Delta S_2^i > 0$. Если $k > k_n$, то $\epsilon_{\lambda_1} > \epsilon_{\lambda_{1n}}$. В этом случае знаменатель первого слагаемого в (2) будет больше по модулю, чем знаменатель второго, так как $|\ln(\epsilon_{\lambda_1})| > |\ln(\epsilon_{\lambda_{1n}})|$. Первое слагаемое будет положительным и по модулю меньше второго (отрицательного), в результате чего $\Delta S_2^i < 0$.

Так как $S_{1p}^i = S_1^i + \Delta S_1^i$ и $S_{2p}^i = S_2^i + \Delta S_2^i$, погрешность $\Delta S_{2н}^i$ для зеркальной двухцветовой температуры излучения определяется выражением (3)

$$\Delta S_{2н}^i = S_{2п}^i - S_{2н}^i = \frac{1}{\lambda_{\text{эКВ}} \left(\frac{1}{\lambda_1 \cdot S_{1p}^i} - \frac{1}{\lambda_2 \cdot S_{2p}^i} \right)} - \frac{1}{\lambda_{\text{эКВ}} \left(\frac{1}{\lambda_1 \cdot S_1^i} - \frac{1}{\lambda_2 \cdot S_2^i} \right)}, \quad (3)$$

где $S_{2п}^i$ – расчетная зеркальная двухцветовая температура излучения для $\epsilon_{\lambda_{1н}}$, $\epsilon_{\lambda_{2н}}$;
 $S_{2н}^i$ – правильная зеркальная двухцветовая температура излучения, которая соответствует ϵ_{λ_1} , ϵ_{λ_2} , отличным от $\epsilon_{\lambda_{1н}}$, $\epsilon_{\lambda_{2н}}$;
 $S_{2н}^{i1н}$ – измеренная двухцветовая (спектрального отношения) температура излучения на $\lambda_{\text{эКВ}}$.

При $\Delta S_1^i > 0$ и $\Delta S_2^i > 0$, $\frac{1}{\lambda_1 \cdot S_{1p}^i} < \frac{1}{\lambda_1 \cdot S_1^i}$ и $\frac{1}{\lambda_2 \cdot S_{2p}^i} < \frac{1}{\lambda_2 \cdot S_2^i}$. Следовательно, $\left(\frac{1}{\lambda_1 \cdot S_{1p}^i} - \frac{1}{\lambda_2 \cdot S_{2p}^i} \right) < \left(\frac{1}{\lambda_1 \cdot S_1^i} - \frac{1}{\lambda_2 \cdot S_2^i} \right)$, а $\Delta S_{2н}^i > 0$ и $\Delta T_{\text{ДКПИ}} > 0$.

Аналогично можно показать, что при $\Delta S_1^i < 0$ и $\Delta S_2^i < 0$,

$\Delta S_{2н}^i < 0$ и $\Delta T_{\text{ДКПИ}} < 0$. Так как $\lambda_{\text{эКВ}} > \lambda_1$ и $\lambda_{\text{эКВ}} > \lambda_2$, то $|\Delta S_{2н}^i| > |\Delta S_1^i|$

и $|\Delta S_{2н}| > |\Delta S_{2к}|$. Например, при $k = 1$, получим $\Delta S_1 = 1,4\text{К}$, $\Delta S_2 = 1,3\text{К}$, $\Delta S_{2н} = 1,9\text{К}$. Обратное значение температуры термометрируемого объекта рассчитывается как полусумма обратных значений измеренной и зеркальной двухцветовых температур излучения [3]. Поэтому, погрешность расчета температуры объекта меньше погрешности для зеркальной двухцветовой температуры излучения примерно в 2 раза. Для указанных условий $\Delta T_{\text{ДКПИ}} = 0,9\text{К}$ (0,058 %).

Относительная погрешность одноцветовой пирометрии излучения на λ_1 изменяется от -0,336 до 0,300 % и определяется выражением [1]

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

Отсюда видно, что при $k < k_n$, $\delta T_{\lambda_1} < 0$, так как $\varepsilon_{\lambda_1} < \varepsilon_{\lambda_1 н}$, а при $k > k_n$, $\delta T_{\lambda_1} > 0$, так как $\varepsilon_{\lambda_1} > \varepsilon_{\lambda_1 н}$. Для одноцветовой пирометрии излучения на λ_2 относительная погрешность определяется выражением, аналогичным (4). В указанных условиях эта погрешность изменяется от 0,456 до -0,434 %. Зависимость $\delta T_{\lambda_2} = f(k)$ также отличается качественно от $\delta T_{\lambda_1} = f(k)$. Это объясняется тем, что при $k < k_n$, $\delta T_{\lambda_1} > 0$, так как $\varepsilon_{\lambda_2} > \varepsilon_{\lambda_2 н}$, а при $k > k_n$, $\delta T_{\lambda_2} < 0$, так как $\varepsilon_{\lambda_2} < \varepsilon_{\lambda_2 н}$. Вследствие влияния длины рабочей волны $|\delta T_{\lambda_2}| > |\delta T_{\lambda_1}|$.

Погрешность пирометрии спектрального отношения пропорциональна отклонению коэффициента селективности излучения от настроечного, изменяется от -3,013 до 2,950 % и определяется выражением [1]

$$\delta T_{\text{CO}} = - \frac{\lambda_{\text{эвб}} \ln\left(\frac{k_n}{k}\right)}{\lambda_{\text{эвб}} \ln\left(\frac{k_n}{k}\right) + \frac{C_2}{T}} \quad (5)$$

При $k < k_n$, $\delta T_{\text{CO}} < 0$, а при $k > k_n$, $\delta T_{\text{CO}} > 0$.

От температуры зависят электромагнитные характеристики металлов и сплавов, которые, в свою очередь, определяют их спектральные распределения излучательной способности в инертной среде или вакууме. Например, для выбранных рабочих волн λ_1 и λ_2 спектральная излучательная способность вольфрама в вакууме при повышении его температуры от 1550 до 1650 К уменьшается соответственно на 0,0026 и 0,0022, а коэффициент селективности – на 0,0005 [2]. В этих условиях погрешности ДКПИ и энергетической одноцветовой на λ_1 и λ_2 , а также спектрального отношения термометрии на $\lambda_{\text{эвб}}$, за счет связанных с температурой изменений излучательных характеристик, по модулю достигают соответственно 0,031; 0,029; 0,033 и 0,027 %. Эти погрешности пренебрежимо малы по сравнению с погрешностями, обусловленными оксидными пленками в обычной атмосфере. Поэтому, температурнозависимые составляющие можно не учитывать при расчете суммарных методических погрешностей. Селективность

излучения металлов и их сплавов определяется воздействием множества случайных факторов, в том числе их химическим составом, количеством неметаллических включений, временной выдержкой, интенсивностью перемешивания и восстановительно-окислительных процессов. Поэтому «селективная» методическая погрешность подчиняется нормальному закону распределения. Имеющие для нормального распределения доверительную вероятность 0,68 средние квадратичные погрешности исследованных методов равны

$$\sigma_{\text{ДКПИ } k} = \frac{|\delta T_{\text{ДКПИ } k}|}{3} = \frac{0,069}{3} = 0,023 \%;$$

$$\sigma_{\lambda_1 k} = \frac{|\delta T_{\lambda_1 k}|}{3} = \frac{0,336}{3} = 0,112 \%;$$

$$\sigma_{\lambda_2 k} = \frac{|\delta T_{\lambda_2 k}|}{3} = \frac{0,456}{3} \approx 0,152 \%;$$

$$\sigma_{\text{CO } k} = \frac{|\delta T_{\text{CO } k}|}{3} = \frac{3,013}{3} \approx 1,004 \%.$$

При доверительной вероятности технических измерений, равной 0,95, указанные погрешности соответственно равны

$$\delta T_{\text{ДКПИ } 0,95} = 2\sigma_{\text{ДКПИ } k} = 0,05 \%;$$

$$\delta T_{\lambda_1 0,95} = 2\sigma_{\lambda_1 k} = 0,22 \%;$$

$$\delta T_{\lambda_2 0,95} = 2\sigma_{\lambda_2 k} = 0,30 \%;$$

$$\delta T_{\text{CO } 0,95} = 2\sigma_{\text{CO } k} = 2,01 \%.$$

При учете остальных методических и инструментальных составляющих «селективные» методические погрешности классической термометрии, и прежде всего спектрального отношения, становятся недопустимыми для технических измерений температуры металла. Для качественного управления металлургическими процессами погрешность измерений температуры металлических сплавов обычно не должна превышать 1,0 %, а в случае, например, непрерывной разливки – 0,5 %.

Таким образом, в результате исследований установлены значительно более высокие метрологические характеристики, по сравнению с известными решениями, разработанного авторами метода двухцветовой компенсационной пирометрии излучения наиболее распространенных в металлургии и машиностроения железоуглеродистых сплавов со случайно изменяющейся в широких пределах селективностью спектральной излучательной способности. В исследованных условиях вызванные селективностью излучения методические погрешности двухцветовой компенсационной термометрии ниже погрешностей классической энергетической одноцветовой на λ_1 и λ_2 , а также спектрального отношения пирометрии излучения металлических сплавов в видимой и ближней областях спектра в 4,4; 6,2 и 40,2 раза, соответственно.

Цель работы – исследование влияния селективности излучения металлических сплавов на методические погрешности оптической термометрии. Для достижения поставленной цели в одинаковых условиях исследованы погрешности нового метода двухцветовой компенсационной, а также классической одноцветовой и спектральной отношения пирометрии излучения. Используются спектральные методы исследований, основанные на полученных из термодинамических законов теплового излучения, в том числе законе Вина, пирометрические уравнения и теория случайных погрешностей. Доказаны значительно более высокие метрологические характеристики двухцветовой компенсационной пирометрии излучения по сравнению с классической термометрией в условиях случайно изменяющейся селективности из-

лучения металлических сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков Л.Ф., Петренко Д.А. Влияние температуры на методические погрешности двухцветовой компенсационной термометрии металлических сплавов // Процессы литья. – 2016. – № 6. – С. 47–53.
2. Шейндлин А.Е. Излучательные свойства твердых материалов: Справочник. // Под ред. А. Е. Шейндлина. – М: Энергия, 1974.
3. 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.

SELECTIVITY INFLUENCE OF HEAT RADIATION OF METALL ALLOYS ON METHODOLOGICAL ERRORS OF THEIR CLASSICAL AND TWO-COLOUR COMPENSATING THERMOMETRY

Zhukov L.F., Petrenko D.A.

Physics-Technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine, 34/1, Vernadsky av., Kiev, 03142, Ukraine. References 3, figures 2.

Key words: temperature, metal alloys, two-colour compensating, energy one-colour and spectral ratio pyrometry, coefficient of selectivity of heat radiation, relative methodical error.

The objective of paper is to research selectivity influence of heat radiation of metal alloys on methodical errors of optical thermometry. To achieve the objective errors of new method of two-colour compensating, classical one-colour and spectral ratio thermometry were researched under the same conditions. Spectral methods of research, based on derived from thermodynamical laws, including

Wien's law, pyrometrical equations and theory of random errors were applied. Under conditions of randomly variable selectivity of heat radiation of metal alloys much more higher metrological characteristics of two-colour compensating pyrometry in comparison with classical thermometry were proved.

1. Zhukov L.F., Petrenko D.A. Temperature influence on methodical errors of two-colour compensating thermometry of metal alloys. Protsessy litya. 2016. № 6. P.47–53. (Rus.).
2. Zhukov L.F., Petrenko D.A., Kornienko A.L. Two-colour compensating thermometry of metal alloys and its instrumental errors. Protsessy litya. 2016. № 5. P.48–58. (Rus.).
3. Sheindlin A.E. Radiative properties of solid materials: Handbook. Moscow. Energia. 1974. 442 p. (Rus.).

Получено 07.02.2017

Received 07.02.2017