

УДК 621.745.5.06/.07:536.5

Жуков Л. Ф., Богдан А. В., Гончаров А. Л., Смирнов М. И.

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ

В металлургии и металлургии машиностроения температура является основным, определяющим эффективность производства, технологическим параметром. Поэтому не случайно, например, на заводах фирмы «Кавасаки сэйтэцу» термометрические приборы, установки и системы составляют около 30 % от общего количества используемых средств контроля.

Высокотемпературные процессы получения, обработки и разлива жидкого металла, являются наиболее ресурсоемкими. Высокая ресурсоемкость определяется как физической природой применяемых технологий, так и значительным уровнем технически неоправданных затрат, в том числе затрат, обусловленных плохим метрологическим обеспечением производств [1–3].

В настоящее время процессы плавки и разлива металла или вообще остаются без температурного контроля или контролируются периодически и только в исключительных случаях – непрерывно, термоэлектрическими или оптическими термометрами. Несовершенство и тем более отсутствие технологического мониторинга недопустимы для современного производства, так как при этом увеличивается брак металлопродукции, энергозатраты в 1,5–2,0 и более раз превышают расчетные, возрастает вероятность аварийных ситуаций, уменьшается срок службы футеровки и производительность металлургических и нагревательных печей, а также другого теплотехнического оборудования.

Требуемый современный непрерывный термоконтроль является идеальной базой для автоматизации наиболее сложных в управлении металлургических печей и агрегатов, позволяющей поднять металлургическое производство на качественно новую ступень. Актуальность непрерывного термоконтроля обостряется еще и тем, что сейчас в развитых странах, с их казалась бы высокой безработицей, вредная для здоровья работа с жидким металлом малопривлекательна для квалифицированного персонала и уже не является дефицитной. Современный непрерывный термоконтроль и автоматизация позволят сделать высокотемпературные металлургические технологии малолюдными или вообще безлюдными и тем самым обеспечат их выживание и использование в будущем.

Целью данной работы является разработка материалов, технологий и оборудования для температурного контроля металлургических процессов при выплавке расплава в плавильных печах и агрегатах.

В результате выполненных в институте работ в соответствии со структурой направления (рис. 1) созданы комплексы методов и средства для температурного контроля металлургических процессов, оборудования и материалов. В составе комплексов разработаны принципиально новые и на современной элементной базе модернизированы лучшие известные технологии контроля [4–8].

Термометрический комплекс построен по модульному принципу и предназначен для непрерывного и периодического контроля, регистрации и регулирования температурных режимов технологических процессов в металлургии машиностроения и большой металлургии, а также в энергетике, керамическом, стекольном, химическом и других производствах. Принципы действия термометрических средств комплекса основаны на:

- световодном формировании и передаче теплового излучения, термометрические параметры которого однозначно связаны с температурой контролируемого объекта;
- бесконтактной пирометрии излучения контролируемой поверхности в зонах и спектральных диапазонах с наиболее стабильными излучательными характеристиками (ε) и пропусканием промежуточной среды (τ), с последующей обработкой первичной пирометрической информации, исключающей остаточное влияние ε и τ на результаты измерений;
- погружении контактных преобразователей в термометрируемую среду или их механическом контакте с термометрируемой поверхностью.



Рис. 1. Структура направления температурного контроля металлургических процессов, оборудования и материалов

Для непрерывного контроля комплекс включает различные модификации стационарных бесконтактных, световодных и контактных термометрических систем, имеющих универсальные одно- двух- или многоканальные вторичные измерительные преобразователи (ВИП) со встроенным цифровым индикатором температуры и выходами на цифropечатающие устройства (ЦПУ) или измерительные регистрирующие приборы (ИРП), регуляторы и сигнализаторы температуры, компьютеры и выносные цифровые индикаторные устройства (ВЦИУ). Системы, в зависимости от условий применения, комплектуются соответствующими первичными пирометрическими преобразователями (ППП); фокусирующими, визирными, охлаждающими и световодными устройствами; защитной арматурой, термоэлектрическими термометрами (ТЭТ) и обеспечивают непрерывный бесконтактный, световодный или контактный контроль температуры сплавов, расплавов, газовых сред и других объектов.

С целью определения и введения температурной поправки на объектах контроля, в промышленных условиях, многоканальные системы имеют калибровочный канал,

укомплектованный термометром для кратковременных периодических измерений действительной температуры. В зависимости от модификации систем поправка определяется и вводится по специальным методикам или программам «вручную» или автоматически.

Непрерывный контроль температуры расплавов непосредственно в металлургических агрегатах, особенно высокотемпературных, актуален практически для каждого металлургического или литейного предприятия и является общей известной проблемой. Для решения рассматриваемой проблемы ФТИМС НАН Украины организованы и выполнены обширные исследования и длительные испытания в промышленных условиях наиболее перспективных современных методов непрерывного температурного контроля расплавов [7–8]. Лучшие результаты показали световодные методы контроля с помощью огнеупорных коррозионно-стойких световодных устройств, стационарно устанавливаемых в футеровке металлургических агрегатов.

Для обеспечения непрерывного контроля металлических расплавов непосредственно в металлургических агрегатах выполнены исследования оборудования с позиций световодной термометрии и исследования световодных методов и средств в условиях получения, обработки и разлива жидкого металла. В результате исследований разработаны огнеупорные коррозионно-стойкие армировочные и световодные материалы, конструкции, технологии изготовления и монтажа измерительных принадлежностей, вспомогательных, световодных и фокусирующих устройств, пирометрических преобразователей и схемы их оптического сочленения, а также общий и частные, для основных типов металлургических агрегатов, методы световодной термометрии металлических расплавов.

На основе выполненных разработок создано несколько типов и модификаций световодных систем непрерывного контроля, регистрации и индикации температуры расплавов в металлургических агрегатах. Базовая система унифицированной конфигурации состоит из индивидуальной, привязываемой к условиям контроля и размещаемой на металлургических агрегатах первичной части, включающей световодное устройство (СУ), устройство оптического сочленения (УОС) и фокусирующее устройство (ФУ), а также из универсальной электронной вторичной части, включающей ППП, ВИП, ИРП и ВЦИУ. СУ предназначено для формирования и передачи через футеровку теплового излучения, термометрические параметры которого однозначно связаны с температурой контролируемого расплава. СУ состоит из световода, армированного силовой конструкцией, которая выполнена из огнеупорных коррозионно-стойких материалов, сочетаемых с футеровкой и контролируемым расплавом. СУ устанавливается в футеровку агрегата на всю её кампанию, в зоне, условия которой наиболее полно отвечают специальным требованиям световодной термометрии. УОС обеспечивает оптическое сочленение ФУ с СУ, а также их герметизацию, механическую защиту и охлаждение. ФУ собирает выведенное СУ из полости металлургического агрегата излучение и направляет его в волоконно-оптический кабель (ВОК). ВОК передает излучение на ППП. ППП преобразует, в наиболее стабильных спектральных диапазонах, термометрические параметры формируемого и передаваемого СУ теплового излучения в электрические сигналы. ВИП преобразует аналоговые выходные сигналы ППП в цифровые, обрабатывает их по заданному алгоритму и выдает информацию о текущей температуре металла на ИРП, ВЦИУ и компьютер. ИРП является аналоговым показывающим и самопишущим регистрирующим прибором и представляет термометрическую информацию в удобной для восприятия форме. ВЦИУ предназначено для цифровой визуальной индикации текущих значений температуры расплава.

В отличие от известных технических решений световодные технологии позволяют осуществить непрерывный контроль температуры расплавов непосредственно в металлургических агрегатах [8].

Эксплуатация в промышленных условиях на отечественных и зарубежных предприятиях показала, что световодные термометрические технологии:

- обеспечивают непрерывный контроль температуры металлических расплавов непосредственно в металлургических агрегатах, в том числе в агрегатах закрытого типа, на всех этапах получения, обработки и разлива жидкого металла. Могут также использоваться для контроля температуры солевых и керамических расплавов, газовых сред, футеровки и для теплового контроля уровня жидких и сыпучих высокотемпературных материалов, границы агрегатного состояния металла, толщины футеровки и других технологических параметров;

- перспективны для использования на конвертерах и вагранках; доменных, электродуговых, нагревательных, стекловаренных и коксовых печах; установках непрерывной разлива металла и другом теплотехническом оборудовании;

- не усложняют эксплуатацию металлургического оборудования, в том числе загрузку шихтовых материалов, наведение и скачивание шлаков и слив металла;

- удобны в обслуживании и перспективны для использования серийных пирометрических и вторичных измерительных преобразователей, приборов и микропроцессорной техники с целью самоконтроля, автоматического определения и введения температурных поправок и регулирования температуры;

- по сравнению с бесконтактным оптическим контролем повышают точность измерений за счет перераспределения излучения по спектру, исключения влияния нестабильности оптических характеристик термометрируемой поверхности и промежуточной среды и увеличения степени тесноты корреляции термометрических параметров формируемого и передаваемого световодом излучения с температурой контролируемого расплава.

Непрерывный термоконтроль металлических расплавов непосредственно в печах стимулировал исследования и последующую ресурсо-, в том числе энергосберегающую, оптимизацию непрерывных процессов получения, обработки и разлива жидкого металла. Например, как показывают выполненные нами исследования на промышленных индукционных печах и анализ полученных математических моделей, использование разработанных на основе непрерывного световодного термоконтроля технологических алгоритмов управления, в том числе в составе АСУТП плавильных отделений, обеспечивает следующие технико-экономические показатели (табл. 1).

Таблица 1

Технико-экономические показатели АСУТП плавильных отделений

Наименование разработок	Объекты внедрения	Технико-экономические показатели				
		Снижение брака по температуре, %	Уменьшение угара, %	Повышение ресурса футеровки, %	Снижение расхода электроэнергии, %	Повышение производительности плавки
Световодные термометрические технологии	Индукционные плавильные, миксерные и разливочные печи	20–60	20–30	20–90	10–30	–
Технологические алгоритмы управления	–/–	20–40	–	30–50	20–40	20–30 %

Для измерений высоких температур, температур удаленных, движущихся и малогабаритных объектов и во многих других случаях методы бесконтактной пирометрии излучения являются наиболее приемлемыми и часто единственно возможными. Современные оптоэлектронные, волоконно-оптические и микропроцессорные технологии обеспечивают снижение уровня инструментальных погрешностей средств оптической термометрии до вполне приемлемых значений. Поэтому в настоящее время метрологические характеристики оптических измерений температуры в основном определяются методическими погрешностями, обусловленными отклонением от единицы и случайными изменениями коэффициентов ε и τ . Устранению влияния ε и τ на результаты измерений уделяется особое внимание в современной оптической термометрии.

Любой оптический термометр (пирометр) измеряет температуру объекта косвенно, через измерения его яркости, имеющей однозначную, определяемую термодинамическими законами теплового излучения, связь с температурой только для термодинамически равновесного излучения. Если тепловое излучение находится в термодинамическом равновесии с термометрируемым объектом, то их температуры равны, $\varepsilon = 1$ и при $\tau = 1$ энергетические пирометры (яркостные и радиационные) обеспечивают измерения действительной температуры объектов. Это следует и из пирометрического уравнения, обобщающего параметры классической (энергетической и двухцветовой) и многоцветовой пирометрии излучения:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S(S_y)} = \frac{\lambda(\lambda_y)}{c_2} \ln[\varepsilon(\varepsilon_y)\tau(\tau_y)], \quad (1)$$

где T – действительная температура объекта, К; $S(S_y)$ – яркостная (цветовая) температуры излучения, К; $\lambda(\lambda_y)$ – эффективная (эквивалентная) длины волн для энергетической (цветовой) пирометрии излучения, м; c_2 – вторая постоянная Планка, К·м; $\varepsilon(\varepsilon_y)$ – излучательная (эквивалентная излучательная) способность объекта; $\tau(\tau_y)$ – коэффициент (эквивалентный коэффициент) пропускания промежуточной среды.

Для двухцветовой пирометрии $\varepsilon_y = \varepsilon_1/\varepsilon_2$, поэтому двухцветовая температура излучения равна температуре объекта для термодинамически равновесного ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$) и «серого» ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 < 1$) излучения, для которых $\varepsilon_y = 1$.

С увеличением количества рабочих волн выражения для ε_y приобретают более сложный вид, обеспечивающий $\varepsilon_y = 1$ при определенной комбинации длин волн для любого характера функции $\varepsilon = f(\lambda)$, включая $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots \varepsilon_n = 1$ и $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots \varepsilon_n < 1$. Такое усложнение алгоритмов получения и обработки первичной пирометрической информации и переход к многоцветовой пирометрии значительно расширяют возможности и область применения оптической термометрии для измерений действительных температур, в том числе с помощью разработанных в составе термометрического комплекса спектрально-компенсационных методов.

Для создания физических, метрологических и технологических основ многоцветовой спектрально – компенсационной термометрии выполнен комплекс термометрических исследований металлических сплавов и систем пирометрии излучения. В результате исследований установлены закономерности влияния спектральных характеристик термометрируемой поверхности металлических сплавов и систем пирометрии излучения соответственно на эквивалентные значения их излучательной способности и длины волны, а также на значения многоцветовых температур излучения. Установлена достаточно тесная для термометрии корреляция измеряемых, при определенных спектральных характеристиках металлических сплавов и пирометрических систем, многоцветовых температур излучения с температурой металла через предложенную характеристическую температуру.

На основе термодинамических законов теплового излучения доказано, что выполненные ранее для исключения методических погрешностей многоцветовой пирометрии сложные математические преобразования спектральных яркостей в итоге сводятся к решению не сформулированной прежде задачи – определению таких значений длин волн или корректировок спектральных яркостей для спектрального распределения излучательной способности металлических сплавов, при которых их эквивалентная излучательная способность равна единице. Выведены математические выражения определяющих параметров (эквивалентной излучательной способности и эквивалентной длины волны) многоцветовой пирометрии излучения. Доказано существование, разработаны инженерные методики расчета и ограничены области критических значений определяющих параметров и длин волн, при которых недопустимо высокие значения методических погрешностей исключают применение многоцветовой оптической термометрии. Расширено применение многоцветовой пирометрии с априорной калибровкой на область практически любых спектральных распределений излучательной способности, для которых выведены расчетные математические формулы и разработаны рекомендации для определения оптимальных значений длин настроечных волн, обеспечивающих равную единице эквивалентную излучательную способность при минимально возможном значении эквивалентной длины волны. Разработаны алгоритмы априорной и апостериорной калибровки систем многоцветовой пирометрии излучения объектов соответственно с известными и неизвестными спектральными распределениями излучательной способности.

Спектрально-компенсационные методы многоцветовой пирометрии излучения устраняют недостатки известных решений [9–10]. В результате исследований спектрально-компенсационных методов многоцветовой пирометрии излучения установлены их высокие метрологические характеристики. Например, погрешности спектрально-компенсационной термометрии железоуглеродистых сплавов в несколько раз ниже погрешностей классической пирометрии излучения, в том числе реализуемой на основе одно- и двухцветовых пирометров известных в мире фирм «Raytek», «Iacon» и «Micron» (USA) и «Land» (UK).

Физические основы спектрально-компенсационной многоцветовой пирометрии излучения обеспечивают её высокую метрологическую эффективность в особо сложных термометрических условиях, в том числе, например, при термоконтроле поверхности заготовки под кристаллизатором, ε_λ которой в видимой и ближней инфракрасной областях спектра случайно изменяется от 0,2 до 0,9 (рис. 2). Причем в зависимости от состояния заготовки спектральное распределение излучательной способности её поверхности $\varepsilon = f(\lambda)$ изменяется не только количественно, но и качественно от спадающего (1) до серого (4) и возрастающего (5). В табл. 2 приведены абсолютные методические погрешности классической и спектрально-компенсационной многоцветовой пирометрии излучения заготовки для 1, 2, 3, 4, 5 и 1–5 состояний её поверхности, соответственно без исключения и с исключением систематической составляющей погрешности путем введения поправок. Сравнительные исследования метрологических характеристик показали, что при температуре поверхности заготовки 1195 °С и случайных изменениях её состояния от 1 до 5 погрешности одноцветового и двухцветового термоконтроля соответственно составляют 44 и 38 °С, а для спектрально-компенсационной многоцветовой пирометрии излучения они не превышают 6 °С. В отличие от классических, разработанные спектрально-компенсационные методы многоцветовой пирометрии излучения обеспечивают непрерывный термоконтроль поверхности заготовки с требуемой точностью, в том числе самый необходимый для оптимального управления непрерывной разливкой металла термоконтроль непосредственно под кристаллизатором.

Для периодического термоконтроля созданы бесконтактные, термоэлектрические контактные и световодные переносные цифровые термометры и стационарные измерительные установки. Термометры состоят из электронного блока со встроенным цифровым индикатором

и автономным источником питания и из линзового, термоэлектрического или линзосветоводного термопреобразователя. Термопреобразователи в зависимости от условий контроля комплектуются сменными термоэлектрическими пакетами, защитными чехлами или моделями АЧТ одно- или многоцветового погружения; ТЭТ или ППП различных типов, градуировок и конструкций. Измерительные установки в соответствии с выполняемыми функциями комплектуются ВИП, ИРП, ЦПУ и ВЦИУ термометрических систем.

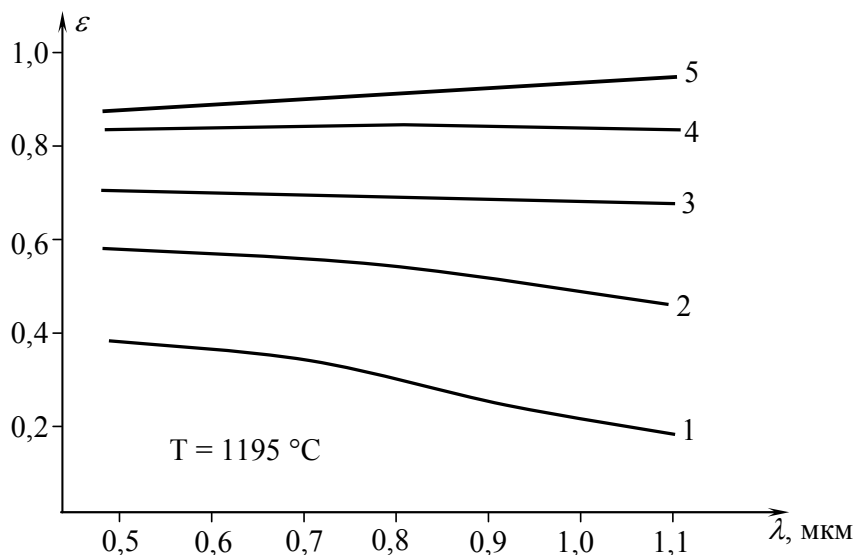


Рис. 2. Изменение спектрального распределения излучательной способности поверхности заготовки в процессе ее окисления

Таблица 2

Абсолютные методические погрешности классической и спектрально-компенсационной многоцветовой пирометрии излучения заготовок

$\varepsilon = f(\lambda)$	Классические методы		Спектрально-компенсационные методы
	Яркостная ПИ	Двухцветовая ПИ	
1	-96	65	4
2	-49	17	2
3	-32	5	1
4	-19	1	1
5	-8	-11	-4
1-5	44	38	4

При промышленном использовании средства термометрического комплекса обеспечивают контроль температуры в диапазоне от 0 до 2500 °С, с погрешностями, обычно не превышающими 0,5 % и оптимальное управление тепловыми технологическими процессами. Это позволяет снизить энергозатраты и угар шихтовых материалов, исключить брак и аварии, обусловленные нарушением температурных режимов, повысить срок службы футеровки и производительность металлургических печей и других теплотехнических агрегатов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, текущее состояние технологического мониторинга процессов получения, обработки и разлива жидкого металла не обеспечивает стабильное получение качественной металлопродукции с заданными свойствами при минимально возможных ресурсах, в том числе энергозатратах и максимальной производительности металлургического оборудования. Для решения этой актуальной проблемы ФТИМС НАН Украины созданы комплекс методов и средств для температурного контроля металлургических процессов, оборудования и материалов. В составе комплекса развиты известные и разрабатываются новые наиболее перспективные технологии контроля.

Термометрический комплекс предназначен для непрерывного и периодического бесконтактного, световодного и контактного измерения температуры в металлургии машиностроения, металлургии и других отраслях производства. В составе комплекса получило дальнейшее развитие разработанное в институте новое световодное направление в термометрии, применительно к непрерывному термоконтролю расплавов, футеровки и газовых сред в металлургических и нагревательных печах и других теплотехнических агрегатах. Разработано и на базе современной оптоэлектронной, волоконной, микропроцессорной и микроспектрометрической техники реализовано новое направление многоцветовой спектрально-компенсационной пирометрии излучения. Многоцветовые методы позволяют решить известную проблему современной оптической термометрии – исключить влияние излучательных характеристик термометрируемых объектов и пропускания сопутствующей промежуточной среды на результаты измерений и за счет этого значительно расширить область применения бесконтактного и световодного температурного контроля. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены значительно более высокие метрологические характеристики разработанных спектрально-компенсационных методов по сравнению с классическими методами яркостной и двухцветовой пирометрии излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматический контроль и регулирование теплового режима коксогозовой вагранки / В. Я. Солтык, А. К. Яценко, В. К. Литовченко, Г. М. Френкель // Автоматизация и механизация процессов литья. – Киев : Наукова думка, 1967. – С. 119–126.
2. Тищенко В. Г. Методы и приборы для измерения и автоматического регулирования температуры жидких металлов / В. Г. Тищенко // Пирометрия жидких металлов : справочник. – Киев, Наукова думка, 1964.
3. Антоненко В. Т. Автоматизация контроля и регистрации состава сплавов в процессе плавки / В. Т. Антоненко // Автоматизация и механизация процессов литья. – Киев : Наукова думка, 1969. – С. 49–57.
4. Пат. 17385 Украина, МПК G01K11/00. Способ лазерной обработки и измерения температуры сплавов / Л. Ф. Жуков ; опубл. 31.10.97, Бюл. № 5.
5. Zhukov L. System of the continuous temperature control of melts in plants / L. Zhukov // Sensor business digest (USA), 1996. – № 2. – P. 8–11.
6. Чугунный Е. Г. Индикация температуры в литейных и термических цехах / Е. Г. Чугунный, В. С. Понятовская // Автоматизация и механизация процессов литья. – Киев : Наукова думка, 1975. – С. 69–70.
7. Жуков Л. Ф. Термопара для длительного непрерывного контроля температуры жидкого чугуна / Л. Ф. Жуков, Е. Г. Чугунный // Автоматизация и механизация процессов литья. – Киев : Наукова думка, 1976. – С. 84–85.
8. Пат. 4533243 (США), МПК G01J 5|08 Light guide for transmitting thermal radiation from melt to pyrometer and method of measuring temperature of molten metal in metallurgical vessel with the aid of said light guide / L. F. Zhukov et al. – Опубл. 18.02.82 ; PCT Pub. №. : WO 82/00518.
9. Жуков Л. Ф. Исследование и разработка методов многоцветовой пирометрии излучения / Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан // ИФЖ, 2002. – № 5. – Т. 75. – С. 165–169.
10. Жуков Л. Ф. Дослідження та розробка методів спектрально-компенсаційної багатокольорової пірометрії випромінювання поверхні заготовки під кристалізатором / Л. Ф. Жуков, О. В. Богдан // Металознавство та обробка металів, 2003. – № 6.