

УДК 621.745.5.06./07:536.5

Жуков Л.Ф.

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины

СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

У статті розглянуто стан контролю температури, складу та структури металевих сплавів. Показано, що технологічний контроль процесів отримання, обробки та розливання рідкого металу не забезпечує стабільного отримання якісної металопродукції при мінімальних ресурсозатратах. Обґрунтовані нові напрями розвитку температурного та експресного теплофізичного світловодного, спектрально-компенсаційного, термографічного, термоелектричного та термодинамічного контролю і доведено високу ефективність його застосування в металургії.

В статье рассмотрено состояние контроля температуры, состава и структуры металлических сплавов. Показано, что технологический контроль процессов получения, обработки и разлики жидкого металла не обеспечивает стабильное получение качественной металлопродукции при минимальных ресурсозатратах. Обоснованы новые направления развития температурного и экспресного теплофизического, световодного, спектрально-компенсационного, термографического, термоэлектрического и термодинамического контроля и доказана высокая эффективность его применения в металлургии.

In this the author have viewed state of control of the metal alloys temperature, composition and structure. Today technological control of the molten metal mocking, treatment and pouring processes docs not secure the stable manufacture of the high – quality metal – production with minimal resource – consumption. The author have based new directions of development of the temperature and express thermophysic light – quide, spectral – compensating, thermographic, thermoelectric and thermodynamic control and proved high efficiency of its application in metallurgy.

c_2 – вторая постоянная Планка;
 K_{yc} – коэффициент усреднения;
 T – действительная температура объекта;
 $S(S_{ц})$ – яркостная, радиационная (цветовая) температуры излучения;
 Δa – отклонение характеристической температуры от измеряемой многоцветовой;
 $\lambda(\lambda_э)$ – эффективная (эквивалентная) длина волны для энергетической (цветовой) пирометрии излучения;
 $\lambda_{но}$ – длина оптимальной настроечной волны;
 $\varepsilon(\varepsilon_э)$ – излучательная (эквивалентная излучательная) способность объекта;
 $\tau(\tau_э)$ – коэффициент (эквивалентный коэффициент) пропускания промежуточной среды.

ВОК – волоконно-оптический кабель;
 ВИП – вторичные измерительные преобразователи;
 ВЦИУ – выносные цифровые индикаторные устройства;
 ИРП – измерительные регистрирующие приборы;
 ППП – первичные пирометрические преобразователи;
 СУ – световодное устройство;
 ТЭТ – термоэлектрические термометры;
 УОС – устройства оптического сочленения;
 ФУ – фокусирующее устройство;
 ЦПУ – цифрорпечатающие устройства;
 П – поправка.

Высокотемпературные процессы получения, обработки и разлики жидкого металла являются наиболее ресурсоемкими в металлургии. Высокая ресурсоемкость определяется как физической природой применяемых технологий, так и значительным уровнем технически неоправданных затрат, в том числе затрат, обусловленных

плохим метрологическим обеспечением производств. Несовершенство и тем более отсутствие технологического мониторинга совершенно недопустимы для современного производства, так как при этом увеличивается брак металлопродукции, энергозатраты в 1,5...2,0 раза превышают расчетные, возрастает вероятность аварийных

ситуаций, уменьшается ресурс футеровки металлургических агрегатов.

На предприятиях с высокой технологической дисциплиной экспрессно или полупрессно термографическими, рентгенофлуоресцентными, оптическими спектральными и ультразвуковыми методами, а также по ионной электропроводности контролируются химический состав, структура и газосодержание сплавов. Основными недостатками указанного контроля являются ограничения по количеству определяемых элементов, экспрессности, метрологическим характеристикам, стоимости и функциональными возможностями.

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.

Лучшие результаты показали световодные методы контроля с помощью огнеупорных коррозионностойких световодных устройств, стационарно устанавливаемых в футеровке металлургических агрегатов. Для технической реализации такого контроля выполнены исследования металлургического оборудования с позиций световодной термометрии и исследования световодных методов и средств в условиях получения, обработки и разлива жидкого металла. В результате исследований разработаны огнеупорные коррозионностойкие 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 металлургических 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, устройство оптического сочленения и фокусирующее устройство, 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 коррозионностойких материалов, сочетаемых с футеровкой и контролируемым расплавом. СУ устанавливается в футеровку агрегата на всю ее 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 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.

В настоящее время освоено промышленное использование световодных термометрических технологий на работающем непрерывно или с зумпфом металлургическом оборудовании, в том числе на индукционных тигельных и канальных плавильных, миксерных и раздаточных печах и разрабатывается модификация системы для кон-

троля температуры расплавов в агрегатах периодического действия.

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 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 повышает 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 [1–3].

Для измерений высоких температур, температур удаленных, движущихся и малогабаритных объектов и во многих других случаях методы бес-

контактной 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 [4–7].

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 из пирометрического уравнения, обобщающего параметры классической (энергетической и двухцветовой) и многоцветовой пирометрии излучения:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S(S_u)} = \frac{\lambda(\lambda_s)}{c_2} \ln[\varepsilon(\varepsilon_s)\tau(\tau_s)].$$

Для двухцветовой пирометрии $\varepsilon_s = \varepsilon_1/\varepsilon_2$, 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 $\varepsilon_s = 1$.

Анализ показывает, что с увеличением количества рабочих волн выражения для ε_s приобретают более сложный вид, обеспечивающий $\varepsilon_s = 1$ при определенной комбинации длин волн для любого характера функции $\varepsilon = f(\lambda)$, включая $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_n = 1$ и $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \dots = \varepsilon_n = \text{const} < 1$. Такое усложнение алгоритмов получения и обра-

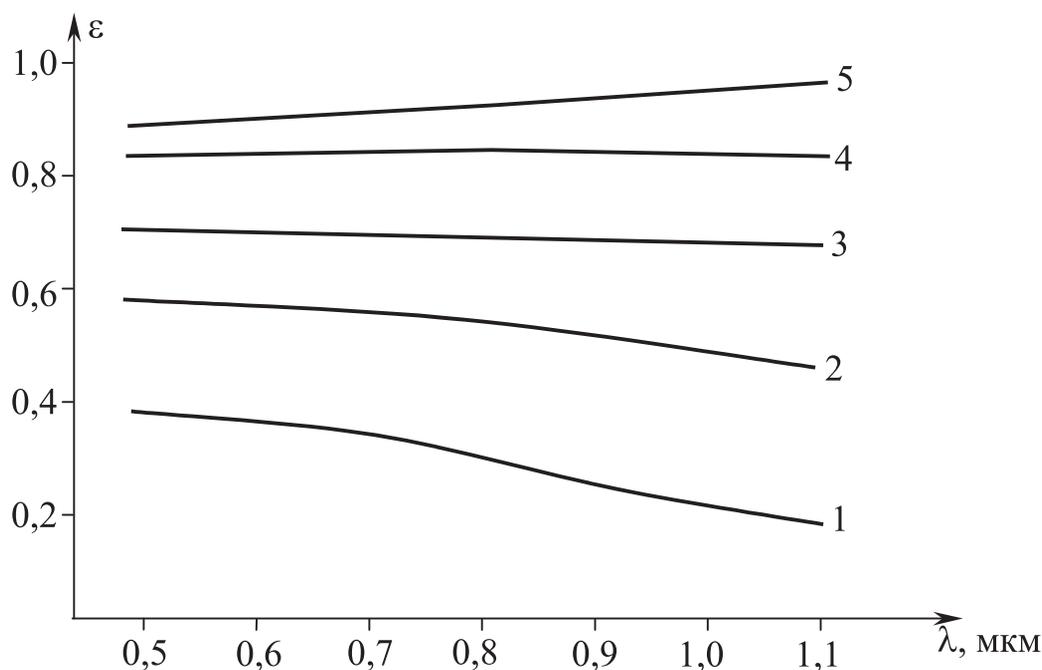


Рис. 1. Изменение спектрального распределения излучательной способности поверхности заготовки в процессе ее окисления.

ботки 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 [8–11].

Спектрально-компенсационные методы многоцветовой пирометрии излучения устраняют недостатки известных решений [6, 12, 13]. В результате исследований спектрально-компенсационных методов многоцветовой пирометрии излучения установлены их высокие метрологические характеристики. Например, погрешности спектрально-компенсационной термометрии железоуглеродистых расплавов в несколько раз ниже погрешностей классической пирометрии излучения, в том числе реализуемой на основе одно- и двухцветовых пирометров известных в мире фирм Raytek, Ircon и Micron (USA) и Land (UK).

Физические основы спектрально-компенсационной многоцветовой пирометрии излучения обеспечивают ее высокую метрологическую эффективность в особо сложных термометрических условиях, в том числе, например, при термокон-

троле поверхности заготовки под кристаллизатором, ε_λ которой случайно изменяется от 0,2 до 0,9 (Рис. 1). Причем в зависимости от состояния заготовки спектральное распределение излучательной способности ее поверхности $\varepsilon = f(\lambda)$ изменяется не только количественно, но и качественно от спадающего (1) до серого (4) и возрастающего (5). В табл. 1 приведены абсолютные методические погрешности классической и спектрально-компенсационной многоцветовой пирометрии излучения заготовки для 1, 2, 3, 4, 5 и 1–5 состояний ее 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 ее состояния от 1 до 5 погрешности одноцветового и двухцветового термоконтроля соответственно составляют 44 и 38°С, а для спектрально-компенсационной пирометрии излучения они не превышают 6°С. В отличие от классических разработанные спектрально-компенсационные методы многоцветовой пирометрии излучения обеспечивают непрерывный термоконтроль поверхности заготовки с

Таблица. Погрешности классической и спектрально-компенсационной пирометрии излучения

$\varepsilon = f(\lambda)$	Погрешности, °С				
	Классические методы		Спектрально-компенсационные методы		
	Одноцветовой $\lambda = 0,85$	Двухцветовой $\lambda_1 = 0,5 \quad \lambda_2 = 1,1$	$\Pi = f(\Delta_a)$	$\lambda_{н.о} = f(\Delta_a)$	$k_{yc} = f(\Delta_a)$
1	-96	65	4	-8	11
2	-49	17	2	-3	6
3	-32	5	1	-1	4
4	-19	1	1	1	1
5	-8	-11	-4	4	2
1-5	44	38	4	6	5

требуемой технологией 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 и условиями применения комплектуются ВИП, ИРП, ЦПУ и ВЦИУ термометрических систем.

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 тех-

нологическими процессами, что 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. Например, непрерывный контроль температуры жидкого металла в индукционных печах позволяет снизить уровень брака по температуре на 20...60 % и расход электроэнергии на 10...40 % и повышает срок службы футеровки на 20...70 %.

Для производства качественной металлопродукции с заданными свойствами при минимально возможных ресурсозатратах и максимальной производительности металлургического оборудования необходимо в процессе получения, обработки и разлива жидкого металла контролировать и выдерживать оптимальными как его температуру, так и химический состав, количество неметаллических включений, степень модифицирования и другие характеристики.

Комплекс теплофизических методов и средств предназначен для такого контроля и включает термографические, термоэлектрические и термодинамические установки для экспресс-анализа железоуглеродистых и цветных, на основе алюминия, меди и цинка, сплавов.

Установки для термографического анализа комплектуются одноразовыми графитовыми погружными и песчаными наливными или многоразовыми (до 1000 проб) окрашиваемыми металлическими наливными изложницами, термоэлектрическими или оптоэлектронными термопреобразователями.

Термографические установки обеспечивают контроль содержания следующих элементов:

- С и Si в чугунах;
- С в сталях;
- Al, Cu в цинковых сплавах;
- Fe, Al, Zn в медных сплавах;
- Si, Fe, Mg, Ni, Cu, Mn, Zn и Ti в алюминиевых сплавах.

Известно, что диаграммы состояния металлических сплавов строятся по результатам наиболее достоверных в настоящее время металлографических, микрорентгеноспектральных и прежде всего термографических исследований. Следовательно, термографический анализ базируется на диаграммах состояния сплавов и поэтому является физически наиболее обоснованным по сравнению с другими методами. Доступный для производства спектральный качественный анализ по числу контролируемых элементов в настоящее время не имеет альтернативы. При этом метрологические характеристики спектрального количественного анализа ограничены, в том числе тем, что даже относительные интенсивности линий зависят от вида и степени возбуждения, а также плотности, температуры и протяженности пути излучения. На результаты спектрального анализа сильно влияет также структура образцов, которую сложно воспроизводить в промышленных условиях.

Во ФТИМС выполнены сравнительные исследования метрологических характеристик анализа химического состава сплавов, в том числе сходимости и воспроизводимости в лабораторных и производственных условиях нескольких институтов и предприятий Украины, России и США. Исследованы наиболее известные методы, в том числе методы химического, термографического, микрорентгено-спектрального и спектрального анализа, которые перечислены в порядке снижения уровня их метрологических характеристик. Дополнительно, для определения объема эвтектики использовали металлографию.

Химический анализ использовался в качестве образцового только при условии тщательной подготовки образцов, которую трудно выдержать в производственных условиях. Для иллюстрации этого был проведен химический анализ крупной ($\delta > 0,5$ мм) и мелкой ($\delta < 0,5$ мм) стружки алюминиевого сплава марки АК21МЗМгН. Результаты химического анализа содержания Si в указанных фракциях отличались почти на 1 %, что более чем в 2 раза превышает допускаемые пределы для этого сплава. Погрешности термографического анализа алюминиевых сплавов как правило, были в 2–3 раза меньше погрешностей спектрального анализа. При изменении структуры образцов для спектрального анализа приведенные соотношения погрешностей возрастает в несколько раз в пользу термографии. Например, результаты спектрального анализа охлаждаемых с различной скоростью фрагментов одной и той же чушки из алюминиевого сплава могут отличаться до 25 %.

Для исключения влияния условий подготовки образцов при проведении химического анализа исследования были повторно выполнены на образцах выплавленных весовым методом по стандартным методикам [14]. На стандартных образцах были подтверждены результаты, полученные при образцовом химическом анализе.

Термографический анализ по сравнению со спектральным дополнительно отличается более высокой оперативностью и дополнительной возможностью контроля следующих характеристик:

- степени модифицирования;
- количества неметаллических включений;
- пористости;
- объема усадочной раковины;
- протяженности границ зерен с последующей оценкой связанных с ней параметров, в том числе дисперсности эвтектики и α – твердого раствора.

Приведенный выше перечень контролируемых элементов не ограничивает возможности термографии применительно, например, к железоуглеродистым сплавам, а прежде всего, показывает необходимость и перспективность развития для них алгоритмов совместной обработки кривых охлаждения и темпа охлаждения образцов, значительно расширивших возможности термографического анализа применительно к алюминиевым сплавам. Экспрессный контроль хими-

ческого состава и перечисленных выше характеристик обеспечивает разработку технологических процессов стабильного получения жидкого металла, с прогнозируемыми свойствами, в том числе режимов обработки расплавов солями, модифицирования и термовременной обработки расплава для получения заданных составов и объемов фаз.

Термографический анализ железоуглеродистых сплавов проводится только по кривым охлаждения образцов, т.е. по температурам фазовых превращений T_L и T_S и ограничивается определением содержания углерода и кремния и расчетом углеродного эквивалента. При этом метрологические характеристики определения содержания углерода не достигаемы для других доступных методов экспресс-анализа, а по кремнию неприемлемы для производства. Поэтому термографические установки, в том числе установки известных в мире компаний, например, HEN – Бельгия и Toshiba – Япония, используются, как правило, только для определения содержания углерода. Значительные погрешности контроля содержания кремния в железоуглеродистых сплавах инициируют развитие алгоритмов обработки первичной термографической информации и создание новых технологий экспресс – анализа.

Разработанные в составе комплекса термоэлектрические установки предназначены для определения углерода, кремния и марганца, не содержат расходуемых элементов и материалов и могут использоваться для чугунов и сталей. Погрешности термоэлектрического анализа по кремнию в 2 и более раз ниже погрешностей термографического анализа. В новых установках использованы биметаллические горячие электроды, на базе микропроцессорной техники усовершенствованы алгоритмы обработки первичной информации и улучшены конструкции, что значительно повысило метрологические характеристики термоэлектрического анализа.

Температуропроводность является перспективным метрическим параметром для контроля структуры чугуна, наиболее сильно зависящим от формы графита. Например, при изменении степени сфероидизации графита от 30 до 70% температуропроводность чугуна изменяется почти в 2 раза, в то время как скорость ультразвука в нем – только на 8...10 %. Увеличение крутизны метри-

ческого параметра почти в 10 раз позволяет повысить статистическую достоверность контроля до 0,95 при 0,6 для традиционно используемого для этих целей ультразвукового контроля. Разработанная термоэлектрическая установка позволяет определять пластинчатую, вермикулярную и шаровидную форму графита в специальных образцах или непосредственно в отливках.

При промышленном использовании методы и средства комплекса обеспечивают контроль содержания указанных элементов в железоуглеродистых и цветных сплавах с абсолютной погрешностью не превышающей 0,1 %, а также дополнительное экспрессное определение основных технологических характеристик.

Методы и средства термометрического и теплофизического комплексов защищены патентами Украины и России, а также 29 патентами в Австралии, Болгарии, Германии, Канаде, США, Швеции и Японии.

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 комплексы методов и средств для температурного и экспрессного теплофизического контроля металлургических процессов, оборудования и материалов. В составе комплексов 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, микропроцессор-

ной 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 пропускающей 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.

Комплекс теплофизических методов и средств, включает установки для термографического, термоэлектрического и термодинамического экспресс-анализа железоуглеродистых и цветных сплавов.

Выводы

В результате сравнительных исследований доказаны более высокие по сравнению с другими методами, в том числе спектральным и ультразвуковым, метрологические характеристики термографического и термоэлектрического анализа химического состава и формы графита. Дополнительно термографические методы и средства позволяют экспрессно определять основные технологические характеристики, в том числе степень модифицирования, количество неметаллических включений, пористость, объем усадочной раковины и протяженность границ зерен и соответственно разрабатывать высокоэффективные технологические процессы стабильного получения жидкого металла с заданными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 4533243 (США). 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. Оpubл. 18.02.82

2. Жуков Л.Ф., Кучаев А.А. Измерение температуры жидкого металла в МГД установках // Магнитная гидродинамика. – 1991. – № 2. – С. 133–135.

3. L. Zhukov. System of the continuous temperature control of melts in plants // Sensor business digest (USA). 1996.

4. А. с. 1500062 А1 СССР МКИ G01J5/06. Способ измерения температуры расплавов / Л.Ф.Жуков, С.В.Кучеренко, В.С.Шумихин.

5. А. с. 1612704 А1 СССР МКИ G01J5/02. Способ измерения температурных режимов в закрытых металлургических агрегатах / Л.Ф.Жуков, А.П.Унинец и др.

6. А.А.Поскачей, Л.А.Чарихов. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. М.: Металлургия, – 1978. – 200 с.

7. Пат. 17385 Украина, МПК G01K11/00. Способ лазерной обработки и измерения температуры сплавов / Л.Ф.Жуков. Оpubл. 31.10.97. Бюл. № 5.

8. Жуков Л.Ф., Богдан А.В. Исследование и разработка методов многоцветовой пирометрии излучения // ИФЖ. – 2002. – Т 75. – № 5. – С. 165–169.

9. Пат. 51076А Украина, МПК G01J5/60. Спосіб вимірювання температури / Жуков Л.Ф., Богдан О.В. Оpubл. 15.11.2002, Бюл. №11.

10. Пат. 53961А Украина, МПК G01J5/60. Спосіб вимірювання температури / Жуков Л.Ф., Богдан О.В., Корнієнко А.Л. Оpubл. 17.02.2003, Бюл. №2.

11. Висновок про видачу деклараційного патенту на винахід по заявці 2002032293 від 24.10.2003. МПК G01J5/00. Спосіб вимірювання температури / Л.Ф. Жуков, О.В. Богдан. Заявл. 22.03.2002.

12. Пат. 4659234 США, МКИ G 03 J 5/00. Emissivity error correcting method for radiation thermometer / Brouwer; Aluminum Company of America. Оpubл. 21.04.1987.

13. Пат. 5772323 США, МПК G 01 J 5/00. Temperature determining device and process / Ralph A. Felice. Оpubл. 30.06.1998.

14. Семенов Н.Г., Памова В.И., Лахов В.М. Принципы законной метрологии в создании и применении стандартных образцов. // Изд. стандартов. 1989.

Получено 23.10.2006 г.