

УДК 621.746.62:669.189

**Е. А. Казачков, А. В. Федосов, Е. А. Чичкарев, В. В. Кислица*,
О. Б. Исаев***

Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

*ОАО МК «Азовсталь», Мариуполь

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ПОМОЩИ ЦИФРОВОЙ ФОТОКАМЕРЫ

Разработана методика определения зависимости величины отклика ПЗС (прибора с зарядной связью) матрицы цифрового фотоаппарата от температуры исследуемого объекта. Рассмотрены особенности метода бесконтактного определения теплового состояния поверхности непрерывнолитой заготовки с помощью цифровой фотокамеры. В условиях ОАО МК «Азовсталь» проведена серия фотоснимков и контрольных измерений оптическим пирометром поверхности непрерывнолитой заготовки с целью оценки точности предлагаемого метода.

Розроблена методика визначення залежності величини відгуку ПЗЗ (прилада з зарядним зв'язком) матриці цифрового фотоапарата від температури об'єкту, що досліджується. Розглянуті особливості методу безконтактного визначення теплового стану поверхні безперервнолитої заготовки за допомогою цифрової фотокамери. В умовах ВАТ МК «Азовсталь» проведена серія фотознімків та контрольних вимірів оптичним пірометром поверхні безперервнолитої заготовки з метою визначення точності метода, що пропонується.

The method of determination dependence of digital camera CCD matrices size response on the temperature of the explored object is developed. The features of method surface strand thermal state contactless determination with the use of digital camera are considered. At the «Azovstal» Iron and Steel Works a range of photos and check measurements of surface strand is conducted by the pyrometer with the purpose of the offered method precision assessment.

Ключевые слова: ПЗС матрицы, цифровой фотоаппарат, температура, сляб, тепловое состояние, оптический пирометр, цифровой фотоснимок, визирование, спектр.

Измерение температуры поверхности непрерывнолитой заготовки представляет большой интерес при изучении процесса кристаллизации слитка и контроля технологических параметров разлива [1]. Однако измерить высокую температуру поверхности непрерывно движущегося слитка среди множества других движущихся элементов конструкции МНЛЗ достаточно сложно. С помощью большинства существующих методов в основном определяют температуру на поверхности сляба в некоторой геометрической точке [2]. Для качественного анализа теплового состояния поверхности сляба этого недостаточно, поскольку температура неравномерно распределена по площади заготовки. Поэтому в последнее время получают развитие методы определения теплового состояния всей поверхности сляба. Новые методы делятся на системы сканирующего типа, когда датчик точечного определения температуры перемещается вдоль излучающей поверхности; системы обработки массива данных, полученных с цифровых фотокамер, тепловизоров [3-5]. Наиболее функциональным является применение тепловизоров, которые об-

ладают весьма высокими техническими параметрами: температурный диапазон камер — $(-40) - 2000^{\circ}\text{C}$, температурная чувствительность — $0,03-0,08^{\circ}\text{C}$ при 30°C , точность — $\pm 2\%$ от показания. Важной функцией тепловизора является возможность получения композитных видео и ИК-изображений в различных сочетаниях, что облегчает анализ термограмм. Однако недостатком тепловизоров является их высокая стоимость.

Целью данной работы является разработка методики оценки теплового состояния поверхности слывов путем обработки растровых изображений, полученных при помощи современной цифровой фототехники.

Развитие цифровой фототехники позволило использовать современные фотокамеры в различных производственных сферах деятельности как инструмент качественного фиксирования динамических и статических процессов с возможностью легкой и удобной обработки полученных данных.

Цифровой цветной фотоснимок представляет собой двухмерный массив данных, каждый элемент которого соответствует точке растра и содержит три компонента, описывающих яркость данной точки в трех участках спектра (R, G, B). В совокупности эти составляющие определяют цвет точки на фотографии.

Металл (объект) при нагреве выше 600°C начинает светиться, то есть излучать энергию в видимом глазу спектре частот. С повышением температуры растет энергия излучения и повышается ее частота. Внешне это сопровождается повышением яркости свечения и изменением цвета светимости объекта. Изменение цвета происходит последовательно от красного к желтому и от желтого к белому. Это излучение может быть зафиксировано с помощью цветной цифровой фотокамеры и представлено в виде файла (в графическом формате) для последующей обработки на компьютере. В данных цифрового снимка изменение светимости металла сопровождается последовательным ростом значений красного, зеленого и синего компонентов.

Параметры фотосъемки сильно влияют на полученные значения цветовых компонентов. Каждая модель фотоаппарата представляет собой индивидуальный набор из оптических элементов, ПЗС матрицы и системы обработки выходного сигнала, в связи с этим передаточная характеристика каждой модели фотокамеры уникальна, что вынуждает проводить индивидуальную калибровку.

Зависимости между входными и выходными данными в пределах одного типа ПЗС матрицы представлены в работе [6], они имеют сложный характер и поэтому предлагается градуировку цифрового фотоаппарата проводить при параметрах, обеспечивающих получение качественного фотоснимка в условиях металлургического цеха. Для съемки в слабо освещенном помещении конвертерных цехов применяли цифровой фотоаппарат Canon Power Shot A640 при следующих значениях: выдержка — $1/13$ с; фокусное расстояние — $21,71$ мм; ISO — 100; диафрагма — 3,5. При этих же параметрах фотосъемки проводилась градуировка фотоаппарата посредством визирования разогретой до определенной температуры прямоугольной стальной пластины размером 20×15 мм, толщиной $0,8$ мм и зачеканенного в нее спая термопары (образец). На рис. 1 представлена схема установки

для проведения градуировки.

Методика проведения эксперимента состоит из следующих этапов: образец 2 с термопарой 4 помещают в электропечь 1, где для защиты образца от излучения нагревателей печи его закрывают защитным кожухом в виде непрозрачной огнеупорной трубы 7. Термопара подключена к милливольтметру 5, который находится в зоне визирования фотоаппарата 3, установленного на штативе 8 так, чтобы нормаль визирования прохо-

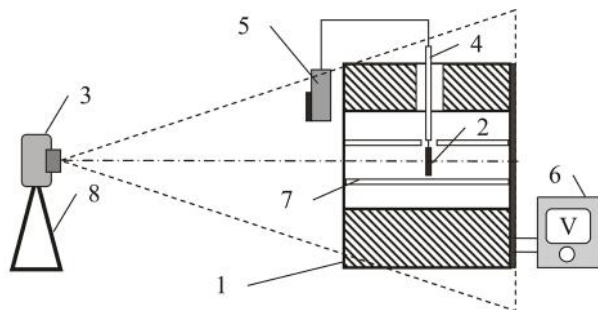


Рис. 1. Схема установки для проведения градуировки цифрового фотоаппарата: 1 - электропечь; 2 - образец; 3 - фотоаппарат; 4 - термопара; 5 - милливольтметр; 6 - трансформатор; 7 - защитный кожух; 8 - штатив

дила через образец. При помощи трансформатора b в печи устанавливается заданная температура, делается выдержка для усреднения температуры и производится процесс визирования образца. Общая точность измерения температуры, ограниченная точностью применявшихся хромель-алюмелевой термопары (0,5 %) и милливольтметра (0,1 мВ), составила $\pm 4^\circ\text{C}$

Полученные результаты визирования подвергаются обработке на персональном компьютере, в результате чего получаем зависимость выходных параметров фотосъемки от линейно возрастающей температуры образца. Красный компонент с повышением температуры визируемого объекта растет по прямолинейной зависимости до момента насыщения, который определяется максимумом сигнала, ограниченного разрядностью аналого-цифрового преобразователя фотокамеры (255 при 8-разрядном АЦП). Зеленый компонент изменяется по параболическому закону. Нелинейность выходных параметров фотокамеры делает процесс обработки снимков неудобным, поэтому, обобщая полученные результаты, нами была выявлена однозначная зависимость между температурой и соотношением уровней цветových компонентов, на основании которой была выведена следующая формула:

$$T = a \frac{(\sqrt{G} + 0,05 \cdot R)}{\sqrt{R}} + b, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где T - температура, $^\circ\text{C}$; a, b - эмпирические коэффициенты; R, G - значения красного и зеленого компонентов отклика ПЗС матрицы соответственно, количество дел.

Представленная формула позволяет учесть нелинейность передаточной характеристики камеры, вносимую ПЗС матрицей и электронной схемой фотокамеры (в частности, гамма-коррекцию). Зависимость температуры от значений данного соотношения представлена на рис. 2.

С целью установления влияния внешних параметров фотосъемки процесс визирования проводился с разного расстояния и при различном внешнем освещении. Анализ полученных данных позволил сделать вывод об отсутствии существенного влияния этих факторов на результат измерения. Таким образом, чувствительность применяемой цифровой фотокамеры в пределах одного снимка позволяет определять изменение температуры в диапазоне 300°C при нижнем пределе чувствительности от 620 до 1100°C в зависимости от значения устанавливаемой выдержки фотокамеры. Полученные интервалы температур хорошо подходят для определения температуры поверхности непрерывнолитого слитка. Представленные градуировочный график и уравнение прямой соответствуют интервалу температур $680\text{--}940^\circ\text{C}$.

Пользуясь данной градуировкой, можно проводить обработку цифровых фотоснимков поверхности слитка при условии соблюдения параметров съемки, установленных в процессе эксперимента. Однако для получения качественных результатов необходимо учесть некоторые особенности процесса визирования с помощью фотоаппарата.

Наличие системы линз в устройстве обуславливает ряд искажений получаемого снимка. Наиболее существенные из них - это геометрические искажения изображения и эффект виньетирования (затенение краев изображения).

Геометрические искажения для камеры Canon Power Shot A640 представлены в виде цилиндрического искажения - в 1,0 % (довольно низко для камеры этого класса) и кро-

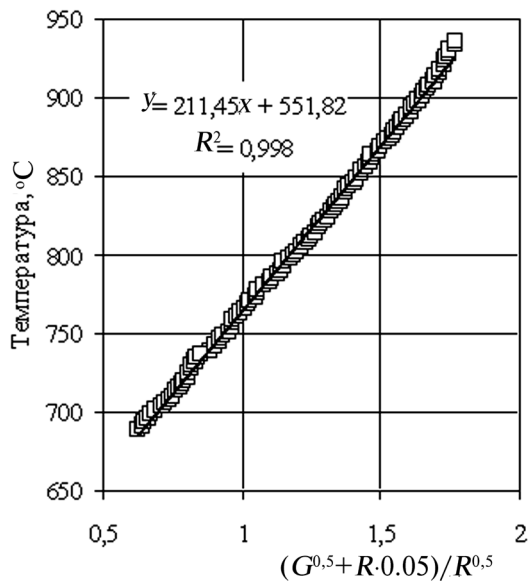


Рис. 2. Градуировочный график для определения температуры по данным отклика ПЗС матрицы цифрового фотоаппарата

шечное (0,2 %) - измеримое подушкообразное искажение. Эффект виньетирования приводит к неправильной передаче яркости по краям изображения, однако большая площадь в центре изображения остается не искаженной. Все эти искажения проявляются на краях кадра, поэтому для повышения точности измерения рекомендуется визировать объект так, чтобы его изображение не занимало площадь, близкую к краям снимка.

Кроме этого при оптической регистрации температуры на полученные результаты оказывает большое влияние угол визирования к поверхности излучения. Для получения минимальной погрешности указанный угол не должен превышать 30° [3]. Поэтому рекомендуется по возможности проводить измерения перпендикулярно к исследуемой поверхности.

С целью оценки точности предлагаемого метода в условиях ОАО МК «Азовсталь» проведена серия фотоснимков и контрольных измерений оптическим пирометром поверхности непрерывнолитого слитка. Измерения проводились на участке газорезки МНЛЗ с соблюдением перечисленных выше рекомендаций. Участок визирования находится на разливочной площадке. Высота визирования составляла 12 м. Расстояние от мениска жидкой стали в кристаллизаторе до точки визирования - 45 м. Угол визирования - 90° .

Для определения теплового состояния поверхности слэба полученные изображения подвергались морфологической обработке, которая заключалась в извлечении компонентов изображения, содержащих информацию о температуре поверхности [7].

После проведения всех этапов обработки цифровой фотоснимок представляет собой массив данных, в котором ряды соответствуют ширине слитка, а столбцы направлены вдоль оси вытягивания заготовки.

При определении температуры поверхности заготовки сложность вызывает наличие на ней окалины, которая на обрабатываемом снимке имеет вид темных пятен с температурой, меньшей температуры основного металла. Это связано с тем, что пласты окалины подвер-

гаются интенсивному охлаждению при контакте с охлаждающей водой и поддерживающими роликами зоны вторичного охлаждения. Условия для вторичного разогрева окалины неблагоприятны, поскольку окалина обладает меньшей теплопроводностью, чем металл, и имеет границу раздела с горячей поверхностью слэба. Окалина на поверхности слитка может располагаться либо в виде пятен, либо почти сплошных полос в зависимости от степени поражения слитка этим дефектом.

Таким образом, для определения истинной температуры поверхности слэба необходимо использовать методы фильтрации регистрируемых данных. Работа алгоритма фильтрации основана на том, что температура окалины заведомо ниже температуры поверхности слитка и, как правило, слои окалины имеют четкую границу с «чистой» поверхностью слэба, что проявляется на снимке в виде резких перепадов температуры. В результате обработки фотоснимка были получены данные о распределении температуры поверхности по ширине слэбовой заготовки и степени поражения слитка окалиной, рис. 3, а.

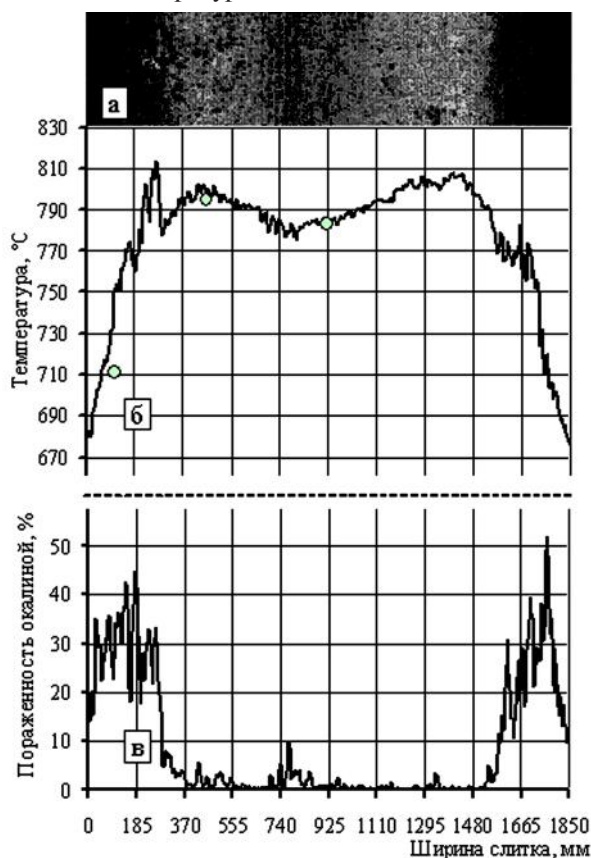


Рис. 3. Результаты обработки цифрового фотоснимка: а - образец фотографии; б - температура поверхности слэба; в - поражение поверхности слэба окалиной; о - измерения пирометром

На рис. 3, б отображается изменение температуры поверхности по ширине сляба. На краях заготовки отмечается минимальная температура сляба. Заметное снижение температуры отмечается также в центре широкой грани сляба. Это понижение температуры связано с особенностью расположения водовоздушных форсунок зоны вторичного охлаждения в последних секциях МНЛЗ. Расположение форсунок в ряд по оси вытягивания слитка приводит к тому, что поверхность сляба в центре охлаждается интенсивнее, чем на периферии.

Для оценки адекватности полученных результатов параллельно с процессом фотосъемки проводились контрольные измерения оптическим инфракрасным пирометром «Cyclops 100» с классом точности 0,5. Для контроля измеряли температуру в трех точках, лежащих на расстоянии 1/15, 1/4 и 1/2 ширины заготовки от левого ребра грани малого радиуса на расстоянии 45 м от мениска жидкой стали. Замеры производились при разливке заготовок на разных машинах при различных применяемых сечениях и марках сталей. Результаты замеров представлены в таблице.

Анализ данных, представленных в таблице, свидетельствует о том, что расхождение между результатами измерений при помощи фотоаппарата и пирометром не превышает 20 °С, что составляет при измеряемых температурах 2 %.

По рис. 3, в можно определить степень пораженности поверхности слитка окалиной по ширине широкой грани сляба. На рисунке хорошо видна низкая степень поражения окалиной центральной части сляба, находящейся под воздействием факелов водовоздушных форсунок. Очень часто плотная пленка окалины присутствует на краях слитка, которые не попадают под действие факелов форсунок. В общем, расположение и степень пораженности поверхности сляба окалиной зависят от условий охлаждения сляба в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ.

На точность определения температуры светящихся тел с помощью цифрового фото и видеоборудования влияет множество таких факторов, как параметры фотосъемки, влияние шумовых эффектов, методика регистрации и обработка снимков. Поэтому в связи с тем, что разработанная методика определения температуры представляет интерес для производства стали целесообразно проводить дальнейшие исследования, направленные на повышение точности метода и расширение его возможностей.

Выводы

- Разработана методика проведения эксперимента по градуировке цифровых фотоаппаратов для определения температуры светящихся тел.

Экспериментальные данные о температуре поверхности непрерывнолитых заготовок на участке газорезки (45 м от мениска жидкой стали в кристаллизаторе)

Номер МНЛЗ	Марка стали	Сечение сляба	Скорость разливки, м/мин	Замер в точке 1/10 ширины заготовки, °C		Замер в точке 1/4 ширины заготовки, °C		Замер в точке 1/2 ширины заготовки, °C	
				данные фото-съемки	замер пирометром	данные фото-съемки	замер пирометром	данные фото-съемки	замер пирометром
3	BO-40	220x1550	0,7	702	696±4*	750	759±4	755	748±4
4	АН-32	250x1850	0,7	727	735±4	809	799±4	798	789±4
5	PO-41	220x1550	0,7	701	692±4	776	769±4	778	786±4
6	X 70	250x1850	1,1	867	873±4	902	894±4	916	909±4

* диапазон температур, приведенный после значений замера пирометром, соответствует погрешности применяемого пирометра

- Построен градуировочный график для определения температуры по данным отклика ПЗС матрицы цифрового фотоаппарата Canon Power Shot A640 для условий слабой освещенности металлургических цехов.
- Рассмотрены факторы, влияющие на точность процесса определения температуры помощью цифрового фотоаппарата, и даны рекомендации по проведению измерений.
- Рассмотрены стадии процесса обработки цифровых фотоснимков с целью получения данных о тепловом состоянии излучающих тел.
- В условиях ОАО МК «Азовсталь» проведена серия фотоснимков и контрольных измерений оптическим пирометром поверхности непрерывнолитого слитка на участке газорезки с целью оценки точности предлагаемого метода. Полученная степень точности представленного метода составляет 2 %.
- Представлен краткий анализ обработки снимков поверхности слабов, сделанных в условиях ОАО МК «Азовсталь». Установлено, что при помощи приведенного метода возможно изучение влияния условий охлаждения слэба на его тепловое состояние.

Список литературы

1. Современная концепция вторичного охлаждения непрерывнолитой заготовки ООО «Уралмаш – Инжиниринг» / Ю. В. Авдонин, Л. В. Буланов, Е. В. Гельфенбейн и др. // Сталь. - 2008. - № 5. - С.16-19.
2. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. - М.: Машиностроение, 1991. - 240 с.
3. Гусев Г. В., Харазов В. Г. Измерение высоких температур в промышленности бесконтактными термометрами (пирометрами излучения) // Промышленные АСУ и контролеры. - 2006. - № 5. - С. 47-51
4. Frick J. W. New Secondary Cooling Systems And Practices / J. W. Frick, R. Boyle // 6-th European Conference on Continuous Casting. - Beijing China, Sept. 2008. — P. 1157-1169
5. Thomas J. P. Strand Surface Temperature Measurements Using Stationery And Scanning Pyrometers / J.P. Thomas, T.N. Natarajan, Il S. // 6-th European Conference on Continuous Casting. - Beijing China, Sept. 2008. — P. 1024-1036.
6. Якушенко Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. — М.: ЛОГОС, 2004. - 480 с.
7. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Техносфера, 2005. - 1072 с.

Поступила 22.12.2008

Вниманию авторов!

С 2009 г. в соответствии с требованиями ВАКа все статьи, поступающие в редакции научных журналов, должны обязательно проходить рецензирование, иметь аннотации и ключевые слова на русском, украинском и английском языках. Объем статьи — не более 10 стр., рисунков — не более 5.

Статьи в редакции поступают 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 черно-белыми, четкими и контрастными.