

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ ПРОКАТНОГО СТАНА

С. И. Чибизова¹, А. М. Беленький²,
А. А. Улановский³, Е. А. Хадзарагова²

¹ НИТУ «МИСиС» (г. Москва, Россия),

² ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)» (г. Владикавказ, Россия),

³ ООО «Обнинская термоэлектрическая компания» (г. Обнинск, Россия)

Показаны особенности и проблемы измерения температуры в нагревательных печах станов горячей прокатки. Главное внимание обращено на повышение точности контроля данного параметра при эксплуатации контактных и бесконтактных термометров в системах автоматического контроля и управления.

Ключевые слова: температура, термопара, пирометр излучения, контроль температуры в печах.

Практически все процессы в науке и технике контролируются и управляются на базе измерительных систем, использующих для контроля температуры термопару и пирометр излучения. Это выполняется с помощью огромного количества измерительных средств (СИ), определяющих параметры объектов и процессов. Измерение как процесс получения информации в форме, удобной для восприятия и передачи, представляет собой взаимодействие компонентов измерительной системы с объектом контроля, в том числе, с влиянием субъекта измерения (человека, контролирующего процесс), и воздействием на него окружающей среды.

Термоэлектрические термометры (ТТ) имеют значительные преимущества перед другими датчиками температуры: пирометрами излучения (ПИ) и термометрами сопротивления (ТС). Они не нуждаются в источнике питания, контролируют температуру в точке, при потенциометрической схеме измерения электрическое сопротивление термопары, компенсационных и соединительных проводов не влияет на точность измерения, размеры спая термопары и диаметр термоэлектродов могут составлять несколько десятков микронов, что исключительно важно при контроле криогенных процессов. ПИ имеют значительную методическую погрешность, связанную с неизвестной степенью черноты объектов. Даже наиболее точный из них — пирометр спектрального отношения (ПСО) может иметь заметную погрешность в реальных условиях измерения.

В таблице приведены особенности системы контроля в автоматизированном технологическом комплексе в металлургии — нагревательном печном агрегате (ПА).

Основной характеристикой средства измерения является погрешность, т. е. отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины. ТТ точнее, чем ПИ, т. к. их основная погрешность связана с самим средством измерения, а у ПИ она в основном определяется па-

раметром объекта — излучательными характеристиками, которые практически не могут быть измерены и принципиально отличаются от АЧТ, по которому градуируется пирометр. На практике часто при помощи ТТ настраивается работа ПИ за счет подбора степени черноты и контактное СИ служит образцовым при поверке бесконтактного средства измерения.

Практически все устройства для контроля температуры можно разделить на три большие группы:

1) стандартные устройства, используемые во многих отраслях производства, которые реализуются с помощью типовых решений с применением серийно изготавливаемых термометров: стеклянных, дилатометрических, биметаллических, манометрических, ТТ, ТС, ПИ;

2) специальные устройства и методы измерения, в которых используются серийные датчики температуры, но в которых реализация усложнена из-за специфики работы агрегата;

3) принципиально новые методы и средства контроля температуры параметров процессов, которые раньше не измерялись по ряду причин, как объективных, так и субъективных.

Нагревательная печь стана горячей прокатки — основной агрегат металлургического предприятия, в значительной мере определяющий достижение главных целей производства: производительность, себестоимость готовой продукции, ее качество. Обеспечение заданного температурного и теплового режимов работы печного агрегата (ПА) — основная цель функционирования АСУТП. Правильный температурный режим обеспечивает: получение необходимого качества готовой продукции (в том числе, структуры металла и сплава), эффективное сжигание топлива (исключение его перерасхода и минимальные экологически вредные выбросы), пониженное образование окалины, минимальное разрушающее тепловое воздействие на конструкцию печи и др. Температура в печи и, особенно, металла — это основа информации о процессе, необходимая для его эффективного функционирования,

Основные признаки и характеристики элементов измерительной системы ПА

Элемент системы	Основные признаки элемента	Характеристики признака
Агрегат в целом	Технологический режим	Постоянный или изменяющийся
	Температурный, газовый режим	Камерный или методический
	Тепловой режим	Постоянный или переменный
	Производительность	Постоянная или переменная
	Наличие или отсутствие воздействия на металл (отрицательное)	Охлаждение на транспортных роликах, глассажных трубах, элементах шагающего пода
Источник теплоты	Вид энергии	Электрическая или химическая теплота топлива
	Вид топлива	Газообразное, жидкое или пылевидное
	Характер выделения теплоты	Концентрированный или распределенный источник
	Теплофизические величины	Поля концентраций, давления, температуры; радиационные характеристики
Газовая среда	Поглощательная способность	Наличие или отсутствие пыли или трехатомных газов
	Уровень давления	Поля статического и динамического давления
	Вид химического потенциала	Восстановительная, окислительная или нейтральная среда
	Теплофизические величины	Теплопроводность, теплоемкость, плотность, вязкость, коэффициент диффузии, радиационные характеристики
Кладка	Теплофизические величины	Теплопроводность, теплоемкость, переменные во времени и в пространстве; радиационные характеристики
	Газоплотность	—
	Инерционность	Время чистого (транспортного) запаздывания. Постоянная времени объекта
Металл	Тип садки	Теплотехнически массивное или тонкое тело; подвижная или неподвижная
	Теплофизические величины	Геометрические величины: длина, ширина, толщина; теплоемкость, теплопроводность, плотность, радиационные характеристики, коэффициент диффузии
Измеритель температуры	Характер измеряемого параметра	Температура металла, газа, кладки или зоны печи
	Метод измерения	Контактный, бесконтактный, расчетный, косвенный, комбинированный
	Инструментальные величины	Погрешность, быстродействие, надёжность, безопасность, экономичность
	Воздействие на объект измерения	Наличие или отсутствие
	Характер проведения замера	Дискретный или непрерывный
Измеритель параметров газового режима	Воздействие на объект измерения	Наличие или отсутствие
	Характер выполнения замера	Дискретный или непрерывный
	Вид основной задачи контроля	Давление. Внешний или внутренний массообмен
	Измеряемая величина	Давление; состав и концентрация составляющих газовой среды; потенциал газовой среды; состав и структура металла или сплава
	Инструментальные величины	Погрешность, быстродействие, надежность, взрывобезопасность, экономичность
	Воздействие на агрегат и объект измерения	Наличие или отсутствие. Атмосфера: окислительная, восстановительная, нейтральная, взрывоопасная, токсичная
	Характер проведения измерения	Дискретный или непрерывный, локальный или интегральный

исследования, диагностики, а также для дальнейшего совершенствования, т. е. проектирования новых агрегатов. На рис. 1 приведены основные СИ контроля температуры поверхности металла и рабочего пространства в печных агрегатах [1]. В современных ПА контролируется температура рабочего пространства (температура зон) и температура металла. В качестве датчиков используются ПИ, визируемые либо на дно карбофраксового стакана 1, либо на металл 3, 4, либо на опорный столбик 7; зональные ТТ, устанавливаемые в своде 2, в боковой стене печи 6, 8; датчики тепломержного типа 5; контактные термопары 9; система мониторинга температуры (СМТ) 10.

Температура рабочего пространства ПА определяет процесс нагрева заготовки и является основным параметром для управления тепловым состоянием отдельных зон и печи. При выборе места установки зонального ТТ необходимо выполнять ряд требований: 1) он должен регистрировать максимальную для данной зоны температуру, что обеспечит получение необходимой объективной информации для оценки процесса теплообмена и исключения разрушения кладки; 2) ТТ должен с минимальным запаздыванием и достаточной чувствительностью реагировать на изменение тепловой нагрузки зон и темпа продвижения металла; 3) на показания ТТ не должны оказывать влияние прямое воздействие факела пламени горелок, открывание боковых окон и заслонок окон погрузки и выдачи заготовок.

ПИ различных типов устанавливаются в специальной защитной арматуре, включающей водяное или воздушное охлаждение корпуса прибора, обдув линзы объектива воздухом или защитным газом для исключения запыления оптики и другие специальные аксессуары. На показания пирометров влияет ряд факторов: переменное значение степени черноты объекта, фоновое излучение кладки или посторонних источников излучения [1, 2], влияние промежуточной среды и окалины. Применение в печах экранов и фурм усложняет их эксплуатацию: необходимо подводить для охлаждения большое количество химически очищенной воды; фурмы должны отстоять от измеряемого металла на значительном расстоянии, что приводит к росту влияния величины фоновой «засветки» либо требует увеличения размеров экрана; в кладке печи необходимо выполнять монтажные отверстия, увеличивающие тепловые потери и снижающие газоплотность ПА. Следует отметить, что ТТ, контролирующие температуру в зонах печей (поз. 2, 6, 8, рис. 1), фактически тоже регистрируют излучение, так как спай термопары в основном нагревается излучением защитного чехла, на который направлено излучение от металла, кладки и газовой атмосферы печи.

Совершенствование систем бесконтактного измерения температуры происходит по двум направлениям: 1) улучшение инструментальных характеристик ПИ; 2) исключение и уменьшение влияния на показания ПИ различных факторов. Создано большое количество разнообразных типов ПИ, которые имеют до-

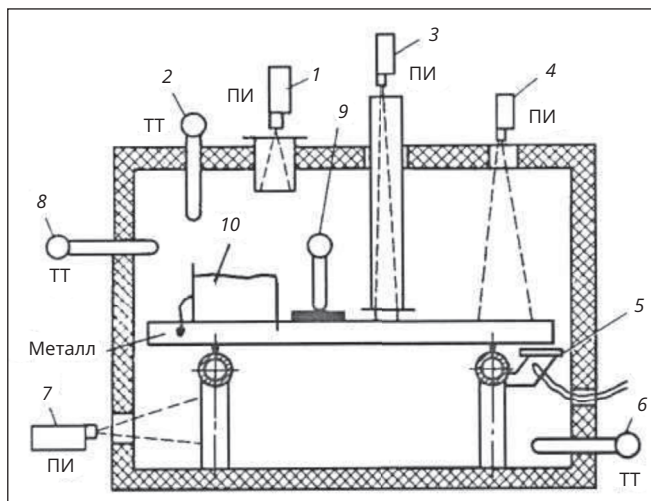


Рис. 1. Методы контроля температуры в нагревательных печах (обозначения в тексте)

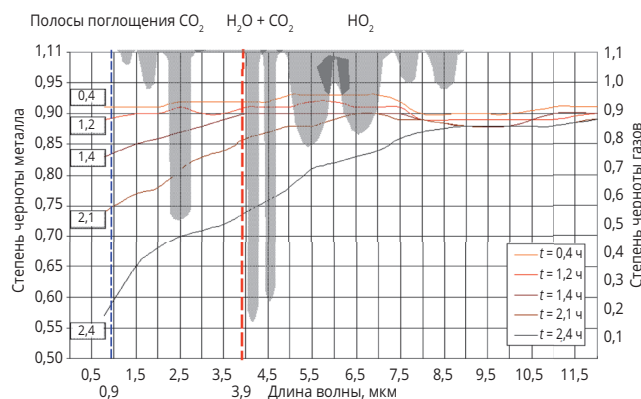


Рис. 2. Полосы пропускания излучения печной атмосферой и зависимость степени черноты окалины от длины волны и времени пребывания металла в печи [2]

статочно высокую точность, хорошее быстродействие, качественную оптику. Однако повышение инструментальной точности и улучшение эксплуатационных параметров ПИ тем не менее не обеспечивают решения главной задачи: повышения их точности в агрегатах и исследовательских установках. Поэтому направление совершенствования систем бесконтактного измерения, призванное решить проблему влияния степени черноты объекта измерения, фонового излучения от сторонних источников, индикатрисы излучения и других факторов на СИ, крайне актуально.

Рассмотрим влияние на контроль температуры поглотительной способности печной атмосферы и изменения спектральной степени черноты окалины на слябе (рис. 2) [1, 2]. На спектральную интенсивность излучения влияют только трехатомные газы. Пары воды имеют полосу слабого поглощения в районе длины волны 1,5 мкм, несколько более сильную в интервале 1,4–2,9 мкм, и очень ярко выраженную в интервале 2,2–3,0 мкм с максимумом 2,7 мкм. Кроме того, у паров воды имеются полосы поглощения в интервалах 4,8–8,5 и 12–30 мкм. Полосы поглощения CO_2 находятся в интервалах длин волн 2,4–3,0, 4,0–4,8 и 12,5–16,5 мкм. При этом в области спектра при длине

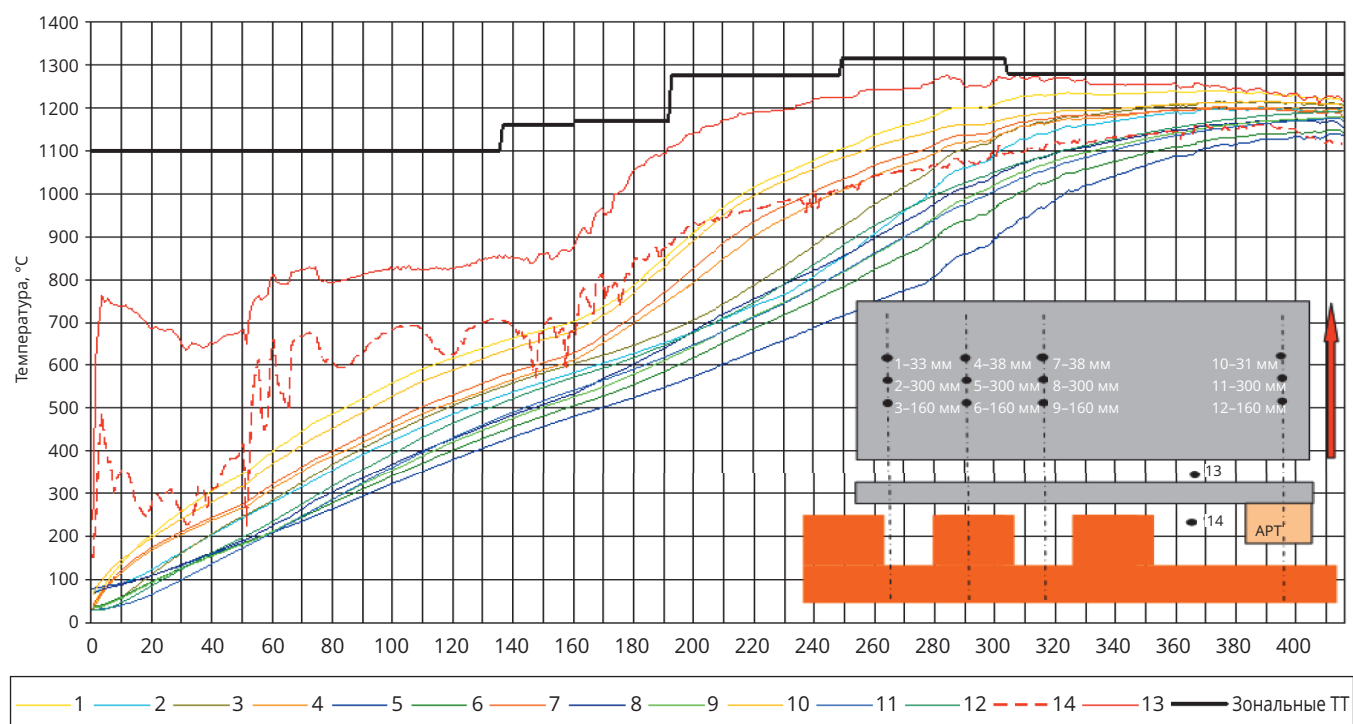


Рис. 3. Изменение показаний термопар в объеме, над и под заготовкой во время ее нагрева в печи прокатного стана 5000

волны 3,9 мкм наблюдается резкое уменьшение коэффициента поглощения обоими газами. Необходимо отметить, что поглощение излучения продуктами сгорания зависит также от уровня температур и толщины газового слоя.

На рис. 2 приведены уникальные данные об изменении спектральной степени черноты окалины от времени ее пребывания в процессе нагрева в печи, из которых следует, что на выходе из печи степень черноты на коротких длинах волн значительно уменьшается. Данные факторы определяют выбор эффективной длины волны в ПЧИ: $\lambda_{\text{эфф}} = 3,9$ мкм более предпочтительна для установки ПЧИ при контроле температуры металла, чем $\lambda_{\text{эфф}} = 0,9$ мкм.

Сотрудниками кафедры «Теплофизика и экология металлургического производства» НИТУ «МИСиС» и специалистами ООО «Обнинская термоэлектрическая компания» («ОТК») — поставщиком высокотемпературных систем мониторинга температурного поля выполнено с помощью таких систем более 100 пропусков экспериментальных слябов на печах прокатных станов 2000, 2500, 2800, 5000 комбинатов НЛМК, ММК, Северстали, Уральской стали и Выксунского металлургического завода. ООО «ОТК» также является производителем широкой номенклатуры термоэлектрических преобразователей, в том числе для измерения температуры в диапазоне 1000-2500 °C [3]. На рис. 3 приведены результаты нагрева сляба толщиной 315 мм с использованием данной системы мониторинга температурного поля.

Проведенные исследования позволили констатировать, что существующие ПА как отечественного, так и зарубежного производства имеют ряд принципиальных недостатков:

не обеспечивается должная равномерность прогрева металла, так как на нижней поверхности сляба остаются недостаточно прогретые места — «темные пятна», являющиеся следствием воздействия водоохлаждаемых элементов системы транспортировки слябов;

несимметричность температурного поля сляба по толщине вследствие разных условий его нагрева сверху и снизу. При этом на стане 5000 в одинаковых печах, построенных по одному и тому же проекту, картина нагрева металла диаметрально противоположна: в одном агрегате металл интенсивнее нагревается сверху, а в соседнем — снизу;

неравномерность температурного поля сляба по длине вследствие разных условий нагрева металла по ширине печи, достигающей 12 м;

значительные удельные расходы топлива, вследствие избыточных потерь тепла на обширную водоохлаждаемую систему транспортировки металла в печи;

потери тепла при открывании крупногабаритных окон посадки и выдачи печи;

большие потери металла с окалиной вследствие длительного пребывания металла в печи (особенно на станах 5000, на которых ведется прокатка слябов толщиной до 400 мм);

отсутствие управления печью по реальной температуре металла, что приводит к тому, что существующие математические модели недостаточно адаптированы к фактическим условиям нагрева металла.

Полученные с помощью СМТ уникальные данные позволили существенно улучшить работу исследованных печных агрегатов, повысить их производительность, снизить расход топлива на 3-5 %, повысить качество нагрева, что означает: исключить перегрев металла, улучшить равномерность температурного

поля сляба, сократить перепад температуры по слябу перед его выдачей из печи, уменьшить на 5-10 % неоднородность температуры раската перед чистовыми клетями.

Остановимся на особенностях измерения температуры в нагревательных печах (НП) станов горячей прокатки как наиболее важных и особенно сложных для решения теплотехнических и технологических задач. Задача управления процессом нагрева металла в проходных НП заключается в выборе и поддержании режима работы, обеспечивающего получение металла заданного качества с минимально возможным удельным расходом топлива в условиях переменной производительности агрегата, а также при переменной температуре посяда: холодный (до 200 °С), «теплый» (до 400 °С) и горячий (до 450-650 °С). Работа ПА оценивается по следующим основным параметрам: температура нагрева заготовки, экономичность сжигания топлива, атмосфера в печи, давление в рабочем пространстве, температура подогрева воздуха и топлива, равномерность нагрева металла по сечению и по длине, которая оценивается косвенно по усилиям при прокатке и показаниям ПИ на стане. Температура нагрева под прокатку зависит прежде всего от состава нагреваемого металла. Так, температура нагрева легированных и качественных сталей 1060-1200 °С, рядовых сталей 1200-1250 °С. Значение температуры нагрева для каждого конкретного случая задается в зависимости от технологии прокатки, характеристики стана, величины обжата, расстояния от печи до стана и др. Конечный перепад температур по сечению заготовки также зависит от вида металла и условий его прокатки. При нагреве под прокатку на тонколистовом стане требования по конечному перепаду температур выше, чем для сортовых станов.

Управление процессом осуществляется в условиях практически непрерывно изменяющихся воздействий: производительности стана, изменения расходов топлива и воздуха, температуры посяда, теплофизических характеристик заготовок и печи (размеров, теплопроводности, подсосов и выбиваний через окна посяда и выдачи, наличия и длительности процесса посяда и выдачи слябов, взаимного влияния процессов регулирования в зонах).

Основные трудности при функционировании НП станов горячей прокатки являются следствием следующих присущих им недостатков.

1. Практически отсутствуют достоверные данные о реальном температурном режиме работы печи. Технологический процесс нагрева, оптимальный в энергетическом и экологическом отношении и обеспечивающий при этом получение заданного качества нагрева, достаточно трудно поддерживать, так как важнейший параметр процесса — температура нагреваемого металла как на поверхности, так и по толщине и длине не измеряется непосредственно в ПА. Для управления режимом нагрева используются показания зональных термоэлектрических термометров (ЗТТ). Эти измерения — фактически какая-то средняя температура, ко-

торая реализуется в результате сложного теплообмена между кладкой печи, продуктами сгорания и металлом и неточно определяет температуру сляба в печи. Чтобы добиться высокой воспроизводимости процесса нагрева, необходимо знать реальное изменение температуры металла в зависимости от его размеров, теплофизических характеристик, темпа прокатки, состояния печи, совершенства процессов сжигания топлива и показаний штатных ЗТТ. Контроль температуры в зонах осуществляется термоэлектрическими термометрами типа ТПП или ТПР, устанавливаемыми в верхних зонах в своде печи, а в нижних — в боковых стенах.

ЗТТ являются основным измерительным средством контроля температуры в зонах (рис. 1, поз. 2, 6, 8). ЗТТ, которые, хотя и имеют в настоящее время небольшую инструментальную погрешность (класс точности 0,5), их методическая погрешность измерений может быть значительной. В верхних зонах печи они устанавливаются в середине зоны. Таким образом, одна точка контроля «отвечает» за температурное поле на площади от 60 до 120 м² (ширина зоны в НП листовых станов достигает 11-12 м, а длина — 8-10 м). В нижних зонах ЗТТ располагают в кладке боковых стен, также регистрируя температуру практически в точке. Следовательно, ЗТТ весьма приблизительно отражают температурный режим работы ПА. Необходимо отметить и тот факт, что показания ЗТТ верхних зон отличаются от температуры печных газов над поверхностью металла в печи и от температуры самой заготовки. В современных АСУТП нагревательных печей отсутствуют методы контроля температуры поверхности и температуры внутри заготовки при ее движении в ПА. Это предопределило необходимость исследования данных агрегатов, которое началось практически с первых НП в России и за рубежом.

2. Сложный режим работы станов, обслуживаемых несколькими НП (от 3 до 5), характеризуется непрерывно и хаотично изменяющимися условиями работы: сортаментом посяда (варьируются марки стали, размеры заготовок, температура посяда (от 20 до 650 °С), темпом прокатки (вплоть до остановки стана — аварийного из-за поломки или необходимого планового для смены валков). Поэтому температурное поле в рабочем пространстве печи непрерывно «дышит», т. е. происходят колебания тепловых потоков и температур по зонам печи. Колебания в разных зонах агрегата не совпадают во времени (по фазе и амплитуде) и влияют друг на друга, так как в последующие по ходу движения заготовок зоны приходит более холодный (нагреваемый) металл, а из последующих в предыдущие зоны поступают потоки излучения и нагретая печная атмосфера, имеющие более высокие тепловые параметры. Значительное влияние на величину и частоту данных волн оказывают посяд и выдача заготовок. Из этого следует, что существующие аналитические математические модели не могут быть достаточно точными, так как не учитывают динамики изменения температурных полей греющей среды.

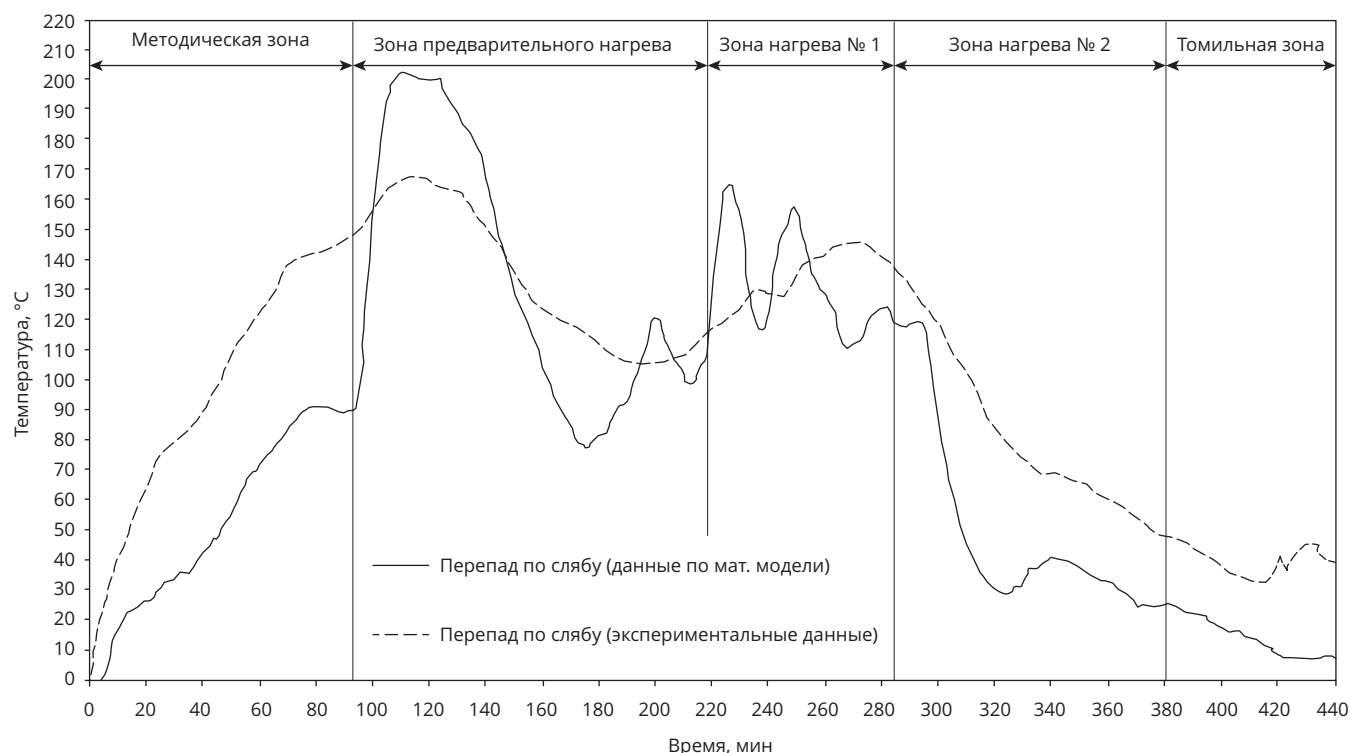


Рис. 4. Изменение перепада температуры по объему сляба по данным эксперимента и математической модели

3. Исключительно важную роль в управлении работой НП играет температура посяда металла. Смешанный посяд приводит к тому, что плот нагреваемого металла имеет неравномерный характер: за 4–5 «горячими» слябами (температура посяда 450–650 °С) может следовать 4–5 холодных слябов, затем 3–5 «теплых» (200–400 °С), и так постоянно. Сложность управления процессом нагрева заключается в том, что по длине печи слябы с разной температурой располагаются хаотично, исходя из задач производства на данные сутки и умения операторов посяда выполнять порядок загрузки. Причем, температуры последовательно загружаемых в печь партий слябов (от 2 до 4–5 шт.) могут значительно отличаться друг от друга как в сторону увеличения температуры посяда, так и сторону ее уменьшения.

4. Аналитические математические модели (ММ), используемые в расчетах при проектировании печей и в алгоритмах управления ими, имеют ряд существенных недостатков из-за принимаемых допущений и сложности при их приложении к реальным процессам нагрева. ММ базируются на следующих трех типах данных: а) параметры, известные (с определенной точностью): размеры печи и отдельных зон; размеры, масса и марки нагреваемого металла; характеристики огнеупоров рабочего пространства ПА: химический состав, теплопроводность, теплоемкость, степень черноты (интегральная и спектральная); химический состав топлива и его теплотворная способность; б) параметры, контролируемые средствами измерений АСУТП (с известными погрешностями): температуры зон, отходящих дымовых газов, подогреваемого топлива и воздуха для горения; расходы и давления топлива,

охлаждающей воды, воздуха, давления в печи, боровах, трубопроводах и др.; в) параметры, определяемые только расчетным путем: распределение температуры в рабочем пространстве печи: в металле (на поверхности и по объему заготовки); в газовой атмосфере (по объему рабочего пространства); поверхности кладки (по всей площади внутреннего рабочего пространства ПА); выделение и определение величин конвективной и радиационной составляющих процесса внешнего теплообмена; кондуктивного теплообмена металла с охлаждающими его элементами транспортной системы ПА (глиссажными трубами, подвижными и неподвижными балками, поверхностью монолитного пода при его наличии); тепловые потери через кладку, окна загрузки и выдачи металла; влияние экранирования заготовки снизу транспортной системой.

В качестве наглядного примера рассмотрим один из наиболее сложных режимов — нагрев массивных заготовок для стана 5000. Были исследованы две аналогичные печи с шагающими балками, выполненные по одному проекту, установленные на одном и том же стане 5000. В обоих экспериментах сляб не был нагрет до параметров, необходимых по технологии и гарантированных поставщиком печей. Вместо заданных АСУТП конечной температуры нагрева $t_{мет} = 1170$ °С и максимального перепада температуры по слябу 20 °С, целевая температура поверхности в обоих экспериментах не была достигнута, а максимальная неравномерность нагрева металла на выдаче из печи составила: 39 °С и 64 °С.

На рис. 4 представлено сравнение реального перепада температуры и перепада, рассчитанного по математической модели (ММ), заложенной в АСУТП печи.

ММ нагрева, на основании которой осуществляется управление печью, т. е. по уровню изменения температуры зон, практически не обеспечивает совпадения с реальным температурным состоянием нагреваемого слэба и неточно отображает процесс нагрева металла в печи. На первом этапе нагрева расчетная модель значительно занижает температуру слэба, а на втором — завышает.

Адекватность математической модели не отвечает современным требованиям высокотехнологического процесса нагрева металла для стана 5000 и необходимо проведение ее адаптации.

Таким образом, ММ нагрева металла при проектировании печи и в алгоритме управления АСУТП базируется на неточной и, следовательно, на недостаточно объективной информации. Поэтому и конструкция печи не позволяет точно воспроизвести заданный температурный режим нагрева и необходимые условия теплообмена, а АСУТП управляет ПА в условиях переменной производительности, изменяющихся характеристик посада (особенно его температуры), а также воздействия процесса производства до печного участка и после него (аварийные остановки, ошибки операторов стана, перевалки и др.). Безусловно, ММ нагрева является хорошим и, необходимо отметить, единственным инструментом для понимания того, как осуществляется процесс нагрева слэба в печи, но для ее эффективного использования необходимо систематически проводить направленные теплотехнологические исследования на действующем агрегате с помощью системы мониторинга температуры, результаты которых будут применяться для адаптации ММ. Это своего рода процедура проверки используемой ММ.

Измерение температуры — это весьма сложная проблема, для решения которой необходим научный подход и искусство подбора оптимальных средств измерений: а) после выбора бесконтактного СИ температуры (ПИ) нужно определить его тип (ПСИ, ПЧИ, ПСО), диапазон измеряемых температур (шкалу прибора), величину инструментальной погрешности, спектральный диапазон приёмника излучения и спектральный диапазон оптической системы ПИ; б) определить и найти необходимые значения спектральных и интегральных характеристик (степени черноты) объекта контроля; в) при отсутствии таких данных (что нередко встречается в металлургической практике) разработчик измерительной системы контроля температуры данного объекта определяет пути исключения или уменьшения величины методической погрешности, связанной в основном с неизвестной степени черноты, за счет одного из трех путей решения проблемы: 1 — создания комбинированной системы контроля температуры, совмещающей ПИ и контактный термоэлектрический термометр (ТТ), который обеспечит возможность градуировки ПИ непосредственно в процессе контроля температуры; 2 — при невозможности решения проблемы с помощью дополнительного контактного СИ (т. е. устройства, исключающего методическую погрешность ПИ), необходимо создать в точке

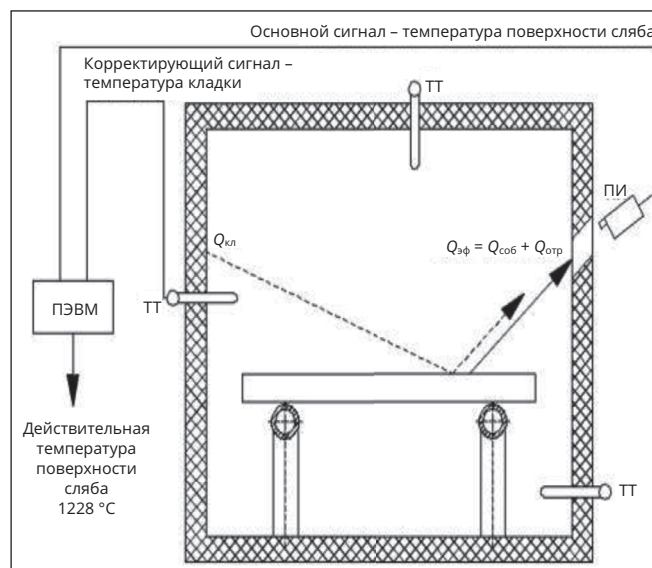


Рис. 5. Схема комбинированной двухсенсорной системы измерения действительной температуры металла в нагревательной печи: ТТ — термоэлектрический термометр; ПИ — пирометр излучения; $Q_{кл}$ — излучение кладки; $Q_{соб}$ — собственное излучение металла; $Q_{отр}$ — излучение, отраженное от металла; $Q_{эф}$ — эффективное излучение поверхности слэба

визирования ПИ условия, близкие к АЧТ, обеспечивая степень черноты на поверхности контроля, близкую к 1 (практически исключается данная методическая погрешность ПИ); 3 — расчетный метод, обеспечивающий введение поправки к показаниям ПИ на фоновое излучение, которая определяется температурным состоянием элементов, окружающих объект контроля.

На рис. 5 приведена двухсенсорная система контроля температуры металла в печи, которая позволяет снизить ошибку измерения за счет корректировки показаний основного ПИ с помощью учета сигнала ТТ, контролирующего температуру кладки, т. е. величину фонового излучения. Данную систему следует устанавливать между методической и нагревательной зонами, между отдельными нагревательными зонами, а также между последней нагревательной и томильной зонами, что позволит существенно повысить эффективность процесса управления печью за счет знания реального темпа нагрева металла.

ВЫВОДЫ

1. Температура является интегральной величиной, определяющей качество конечного продукта, в условиях действующего агрегата, необходимой производительности, минимизации затрат топлива, электроэнергии, воды, защитной атмосферы. Ее контроль обеспечивает правильное функционирование ПА. Основные устройства, контролирующие данный параметр — термоэлектрические термометры и пирометры излучения.

2. Несмотря на наличие достаточно эффективных СИ (точных, быстродействующих, надёжных в эксплуатации), процесс измерения температуры зависит в значительной мере от знаний, умений и искусства разработчиков и эксплуатирующего персонала.

3. Нагревательная печь стана горячей прокатки является весьма сложным агрегатом с точки зрения обеспечения точного контроля температуры: высокий уровень параметра, непрерывное изменение условий измерения, управление практически ведется по точечным измерениям теплового состояния зоны, и не учитывается сложность и непрерывная динамика температурных полей кладки, обрабатываемого металла и газовой атмосферы.

4. Доказанным экспериментальным средством повышения эффективности функционирования ПА и улучшения его работы являются направленные тепло-технологические исследования, выполняемые на действующем агрегате с помощью системы мониторинга температуры не менее 1-2 раз в год.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бельский А.М., Бурсин А.Н., Курносов В.В. и др. Метрология и теплотехнические измерения : учебник / под ред. А.М. Бельского. — М. : ИД НИТУ «МИСиС», 2019. — 396 с.
2. Бельский А.М., Дубинский М.Ю., Ладыгичев М.Г. и др. Измерение температуры: теория, практика, эксперимент. Т. 2. Измерение температуры в промышленности и энергетике / под ред. А.М. Бельского, В.Г. Лисиенко. — М. : Теплотехник, 2007. — 736 с.
3. Улановский А.А., Таакс М., Бельский А.М. и др. Использование автономной автоматизированной системы компании PHOENIX TM для мониторинга температурного поля нагреваемого металла в металлургических печах // Черные металлы. 2019. № 9. С. 54 — 60.

Статья поступила 31.01.2024

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Журнал «Сталь» публикует статьи о новых технологиях и оборудовании, а также о совершенствовании уже применяемых в черной металлургии, о передовом опыте улучшения качества и повышения конкурентоспособности продукции, путях достижения рентабельности производства, уменьшении вредного воздействия на окружающую среду и о других важных для отрасли вопросах.

В статье следует сообщить цель проведения работы, привести фактические данные, их анализ и дать заключение (выводы). Текст статьи объемом не более 12 страниц должен быть дополнен **кратким рефератом** (3 — 5 предложений) и **ключевыми словами на русском и английском языках**, указанием УДК, а также списком подписей к рисункам. Библиографический список следует оформлять в соответствии с ГОСТ 7.1—2003; на труднодоступные источники просьба не ссылаться. Рисунки (рекомендуемая норма — до 5) должны быть четкими, упрощенными и не загроможденными надписями, без масштабной сетки (за исключением номограмм).

К статье должен быть приложен список авторов с указанием ФИО полностью на русском и английском языках, места работы каждого, телефона и электронного адреса.

Число авторов от 1 — 2 организаций не должно превышать 5 человек. Если статья представлена от большего числа организаций, то допускается в среднем по два человека от каждой организации.

Все материалы статьи редакция просит представлять в электронном виде (текст — в программе Word (Times New Roman, размер шрифта 12, междустрочный интервал 1,5)), рисунки — отдельным файлом в форматах TIFF или JPEG, диаграммы — в формате EXCEL).