

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОМПАНИИ PHOENIX TM ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НАГРЕВАЕМОГО МЕТАЛЛА В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

А. А. УЛАНОВСКИЙ, М. ТААКЕ, А. М. БЕЛЕНЬКИЙ, А. Н. БУРСИН, С. И. ЧИБИЗОВА\*

*Энергоэффективный технологический процесс в нагревательных печах направлен на обеспечение оптимального температурного режима в рабочем пространстве агрегата. Основным параметром процесса — фактическую температуру металла — в печах практически не контролируют. Управление печью ведут по показаниям зональных термопар, которые неточно отслеживают тепловое и температурное состояние нагреваемого металла в агрегате. Для обеспечения заданного качества нагрева и термообработки металла необходимо знать фактическое изменение его температуры в зависимости от теплофизических характеристик материала, скорости продвижения через агрегат и показаний рабочих средств измерения АСУ ТП печи.*

*Изложена методика исследования промышленных агрегатов на базе автоматизированной системы компании Phoenix TM, которая позволила усовершенствовать процессы нагрева на зарубежных и отечественных предприятиях в 1999–2018 гг.*

**Ключевые слова:** металлургический печной агрегат, температурный режим, система мониторинга, Phoenix TM, направленный промышленный эксперимент, повышение качества нагрева.

## Введение

От функционирования нагревательных и термических печей станов горячей и холодной прокатки зависит качество продукции и энергоэффективность производства в первую очередь листовой продукции, объем выпуска которой в передовых металлургических странах превышает 70 % всего выпуска металла [1].

К сожалению, совершенствование тепловой работы нагревательных (НП) и термических печей (ТП) на основе исследований процесса нагрева металла в нашей стране проводят недостаточно часто. Более внимательное отношение к функционированию данных агрегатов приведет к росту эффективности печей и станов горячей прокатки, уменьшению расхода топлива, повышению качества готовой продукции и снижению стоимости ремонтных работ.

О важнейших параметрах нагретого металла: температуре на выдаче, перепаде температур по отдельной заготовке и по садке — можно судить только по косвенным параметрам (средней температуре

раската, которая зачастую укладывается в установленный диапазон), что не совсем верно. В процессе нагрева перепад температур по слябу (как по толщине, так и по длине) может достигать 481 °С, что существенно влияет на структуру готового металла, так как «горячая» и «холодная» части слябов находятся при температурах фазового превращения в течение различного времени, а на выдаче перепад по массе нагретой заготовки может достигать 177 °С.

Большие возможности для обеспечения оптимальной работы печей открывает знание действительного температурного поля как внутри рабочего пространства, так и в металле. Кривые нагрева в режиме реального времени дают точное представление о тепловом состоянии всех зон печи и заготовки, что позволяет отработать технологию энергосберегающего режима нагрева. Наиболее надежным способом решения задачи совершенствования тепловой работы печей, а следовательно, и проблем повышения эффективности их функционирования, является проведение направленного промышленного тепло-технологического эксперимента на действующем агрегате в режиме его нормальной эксплуатации [2]. Оптимально настроенная печь позволит получить существенный экономический эффект, который превысит все издержки на ее тепловое обследование.

## Методология промышленного эксперимента

В наши дни системы внутрипечного мониторинга температуры применяют на отечественных предприятиях черной и цветной металлургии, при производстве керамики и стройматериалов, в процессах термообработки машиностроительного производства. Они доказали свою эффективность на заводах алюминиевого

\*ООО «Обнинская термоэлектрическая компания», Обнинск, Россия;

канд. техн. наук А. А. Улановский, директор;

Компания PhoenixTM GmbH, Vad Oeynhausen, Германия;

М. Тааке, директор;

ООО «Инновации и энергосбережение», Москва, Россия;

док. техн. наук А. М. Беленький, генеральный директор;

А. Н. Бурсин, инженер, старший научный сотрудник;

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия;

канд. техн. наук С. И. Чибизова, доцент кафедры «Энергоэффективные и ресурсосберегающие промышленные технологии»;

эл. почта: energomet@misis.ru

© Улановский А. А., Тааке М., Беленький А. М., Бурсин А. Н., Чибизова С. И., 2019

проката ООО «АЛКОА-Рус» и Каменск-Уральского металлургического завода, прокатных станах ПАО «НЛМК», ПАО «Северсталь», ПАО «ММК», ОАО «Выксунский металлургический завод», ОАО «Уральская сталь», в вакуумных печах Электростальского ПАО «МСЗ», покрасочных камерах и проходных туннельных печах кирпичных заводов.

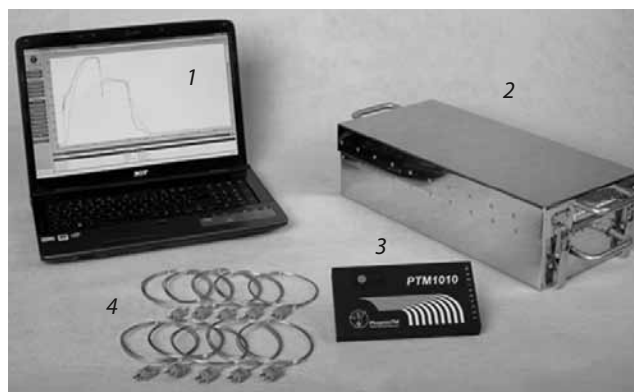
Компания Phoenix TM (Германия) имеет огромный опыт работ в данном направлении и является одним из ведущих мировых изготовителей таких систем [3]. Их основная особенность заключается в том, что электронный регистратор данных находится внутри печи (или проходит через нее) и защищен от воздействия высокой температуры высокоэффективным теплозащитным контейнером. С помощью кабельных термопар, подключенных к регистратору и выведенных из контейнера, измеряют температуру в контрольных точках сляба и определяют его реальное температурное поле на предмет соответствия технологии, а также правильности расчета теплового состояния металла математической моделью (ММ).

Использование данной системы в комплекте с радиомодемом обеспечивает быстрое получение в режиме online надежных данных о температурных полях металла и печи, необходимых для системы контроля качества, ведения энергоэффективного процесса нагрева, режима прокатки на стане и обеспечения безопасности работы печного агрегата.

Системы мониторинга (рис. 1) можно конфигурировать в зависимости от технологических параметров процесса в печи. Ядро системы — автономный регистратор температуры, обеспечивающий длительную работу при температуре 110 °С. Оператор предварительно программирует регистратор, задавая момент начала работы, число термопар и частоту опроса каналов от 1 с до 1 ч в режиме радиотелеметрии. Память регистратора рассчитана на 3,8 млн измерений.

В качестве датчиков температуры применяют гибкие кабельные термоэлектрические термометры типов К (ХА) или N (НН) 1-го класса точности с погрешностью измерения температуры не более 0,4 % в металлической оболочке из жаростойких сплавов Inconel или Nicrobel диаметром 1,5 или 3 мм. При использовании термопар на предельных температурах рекомендуют их однократное применение [4]. Для особых случаев систему комплектуют термопарами из благородных металлов с погрешностью измерения не выше 0,25 %.

Контроль температуры изделия во время проведения эксперимента осуществляли термопарами, рабочие спаи которых устанавливали в различных точках заготовки по глубине, ширине и длине. Барьер-испаритель, заполненный водой, и наружный слой керамоволокнистого теплоизоляционного материала исключали воздействие высоких температур на регистратор в процессе его нахождения в рабочем пространстве печи.



**Рис. 1. Автономный регистратор температуры и теплозащитный контейнер компании Phoenix TM:**  
1 — портативный компьютер; 2 — теплозащитный контейнер; 3 — электронный автономный регистратор температур; 4 — гибкие термоэлектрические термометры

Система Phoenix TM оснащена приемо-передающим устройством и высокотемпературной антенной, что позволяет оператору печи наблюдать за изменением температуры металла и печи в процессе нагрева заготовки в режиме реального времени на экране монитора. Это обеспечивает уникальную возможность при длительных процессах нагрева или термообработки оперативно воздействовать на технологический процесс во время нахождения заготовки в печи.

После выхода экспериментальной заготовки с установленной системой мониторинга из печи теплозащитный контейнер с регистратором данных переносят в зону разборки, наружную теплоизоляцию снимают, а регистратор данных извлекают из контейнера.

Программное обеспечение, поставляемое в комплекте с системой Phoenix TM, позволяет получать результаты измерений как в графическом, так и в табличном виде. Обработка полученных данных обеспечивает персонал достоверной информацией о реальном процессе нагрева в печи: равномерности нагрева по длине и ширине сляба, достигнутым уровням прогрева по зонам печи, достаточности времени выдержки. Определяют разность температур металла и штатной зональной термопары и правильность технологического процесса. Собранный система на слябе представлена на рис. 2.

### Полученные результаты и их обсуждение

Общий годовой выпуск горячекатаного листа на печных агрегатах, на которых авторы статьи проводили исследования, разрабатывали и внедряли усовершенствованные режимы работы, превышает 25 млн т. Результаты исследований работы печей различного типа, выполненных ООО «Обнинская термоэлектрическая компания», ООО «Инновации и энергосбережение», НИТУ «МИСиС» и PhoenixTM, GmbH с помощью системы мониторинга температурного поля Phoenix TM и аналогичных ей, приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты исследования металлургических печных агрегатов различных предприятий

| Предприятие                                     | Агрегат  | Данные исследования (время в печи/ $T_{max}$ в печи/число каналов измерения/число экспериментов) | Период (годы) | Результат  |
|---|--|--|---------------|--|
| ОАО «Уральская сталь»,<br>(Новотроицк)          | НП толкательная стана 2700 № 1 smi (Бельгия)<br>№ 3 (ЛенГипромет)    | 3,5 ч/1300 °C/10/3<br>6,5 ч/1300 °C/10/1   | 2011          | НП № 1 не обеспечивает достижения параметров нагреваемого металла, необходимых для проведения качественной прокатки. ММ НП № 1 некорректно описывает процесс теплообмена в агрегате, и ее использование не обеспечивает получения заданных параметров готового металла (15–20 °C), реальный перепад температур по слябу составляет 71 °C. Ошибочность ММ подтверждена и тем, что нижняя поверхность сляба нагревается быстрее, чем верхняя, а согласно ММ — наоборот ( <b>рис. 3</b> ). НП № 3 несколько лучше решает задачу по нагреву металла, хотя использовано топливо с калорийностью в два раза ниже, чем в НП № 1. Разработаны рекомендации по совершенствованию тепловой работы и конструкции НП № 1 и 3 |
| ОАО «Выксунский металлургический завод» (Выкса) | НП № 1 и 2 с шагающими балками стана 5000 Fives Stein (Франция)      | 7 ч/1200 °C/10/2   | 2011–2012     | Получены реальные данные нагрева металла. Расчетные данные ММ не совпадают с реальным температурным состоянием нагреваемого сляба и недостаточно адекватно отображают процесс нагрева металла. Не обеспечены заявленные поставщиком печи параметры: недогрев металла и значительное превышение перепада по слябу на выдаче ( <b>рис. 4, 5</b> ). Выявлены недостатки в конструкции печи. Разработаны рекомендации по совершенствованию тепловой работы и конструкции печного агрегата  |
|   | Литейно-прокатный модуль, роликовая туннельная печь Danieli (Италия) | 50 мин/1200 °C/8/2   | 2011–2012     | Получен реальный температурный график нагрева металла и распределение температур в рабочем пространстве печи над движущимся слябом. Разработан и внедрен алгоритм введения корректирующей поправки в показания пирометров  |
|   | Колесопрокатное производство. Кольцевые печи № 1 и 2 (СССР)          | 7 ч/1300 °C/10/2   | 2011–2012     | Впервые в металлургической практике получены реальные данные нагрева колесной заготовки при ее последовательном прохождении через две кольцевые печи. Разработан и проверен новый режим нагрева, который позволяет увеличить производительность на 10–15 заготовок в час. Снижен перепад температуры по заготовке на выдаче с 39 до 24 °C. Исключен перегрев металла. Экономия топлива составила 257 м³/ч (10 %). Разработаны рекомендации по совершенствованию тепловой работы и конструкции печного агрегата   |
| ОАО «ММК» (Магнитогорск)                        | НП с шагающими балками стана 2000 (Стальпроект)                      | 4,5 ч/1350 °C/12/2   | 2002–2003     | Получены реальные данные нагрева металла. Выявлены недостатки в конструкции печи и системе автоматического управления. Разработаны рекомендации по совершенствованию тепловой работы и конструкции печного агрегата  |
|   | НП толкательные стана 2500 (Стальпроект)                             | 4 ч/1380 °C/7/1  |               |  |
|   | НП с шагающими балками стана 5000 (Китай)                            | 5 ч/1250 °C/10/1   | 2009          | Получены реальные кривые нагрева металла при сдаче печи в эксплуатацию   |
|   | НП с шагающим подом сортового стана 450 Danieli (Италия)             | 2,3 ч/1250 °C/10/2   | 2012          | Получены реальные кривые при нагреве заготовок. Выявлены недостатки в работе печи, ее конструкции и работе ММ. Разработаны рекомендации по совершенствованию тепловой работы печей   |
|   | НП с шагающими балками стана 5000 (Китай)                            | 5–6 ч/1250 °C/10/4   | 2015–2016     | Разработан и внедрен новый режим нагрева металла. Получена экономия топлива 0,8–1,1 кг у.т./т. Снижен максимальный перепад температуры по металлу в процессе нагрева с 369,9 до 233 °C (металл более равномерно прогрет, что обеспечивает повышение однородности структуры). Достигнуто значительное снижение перепада температуры по металлу на выдаче из печи ( <b>рис. 6</b> ). Разработаны рекомендации по совершенствованию печного агрегата  |

| Предприятие   | Агрегат  | Данные исследования (время в печи/ $T_{max}$ в печи/число каналов измерения/число экспериментов) | Период (годы) | Результат  |
|---|--|--|---------------|--|
| ОАО «НЛМК» (Липецк)   | НП стана 2000 (Стальпроект)  | 4,5 ч/1370 °C/7/4  | 1999–2000     | Получены реальные кривые нагрева металла в толкательных печах и печах с шагающими балками  |
|   | НП с шагающими балками стана 2000 Herbel (Бельгия) Комбинат самостоятельно провел 12 дополнительных пропусков экспериментальных слябов с системой Phoenix TM | 4,5 ч/1370 °C/7/4  | 2013          | Повышена среднemasсовая температура металла на выдаче с 1203,4 до 1225,9 и 1239,6 °C. Максимальный перепад по слябу на выдаче снижен с 79,9 до 50,6 и 43,8 °C. Уменьшен удельный расход топлива на 4,4 %. Повышена равномерность температуры раската на 12 %. Разработаны рекомендации по совершенствованию тепловой работы и конструкции печного агрегата. MM неверно рассчитан процесс нагрева, необходима серьезная корректировка как в концепции процесса нагрева, так и в изменении величин адаптационных настроечных коэффициентов |
| ОАО «Северсталь» (Череповец)  | НП стана 5000 с проходными тележками LOI (Германия)  | 10 ч/1290 °C/14/5  | 2006–2008     | Получены реальные данные нагрева металла. Выявлены недостатки в конструкции печей. Разработаны рекомендации по совершенствованию тепловой работы и конструкции печных агрегатов. Показано, что длительность пребывания слябов в камерной печи можно сократить с 19,5 до 14 ч   |
|   | Камерная НП стана 5000 (ЛенГипромез)   | 19,5 ч/1290 °C/14/2  |               |  |
|   | Толкательная НП стана 350 (Стальпроект)  | 1,5 ч/1300 °C/7/1  | 2001          | Получены реальные данные нагрева металла   |
|   | НП с шагающими балками стана 2000 (ЛПЦ-2) (Стальпроект)  | 4 ч/1280 °C/13/5   | 2017          | Получены реальные данные нагрева металла. Разработаны MM нагрева слябов и энергоэффективные режимы нагрева холодного и горячего посадков. Снижены расход газа на ~10 % и максимальный перепад по сечению сляба на выдаче   |
| ОАО «РМЗ» (Ревякино)  | Толкательная НП стана 150 (Стальпроект)  | 1,5 ч/1350 °C/7/6  | 2004–2006     | Определены недостатки работы и конструкции печи, что послужило основой для строительства новой печи  |
| ПАО «Машзавод» (Электросталь)   | Вакуумная печь VSQ, ALD $d = 600$ мм, $h = 3$ м (Германия)   | 5 ч/1050 °C/10/1,<br>5 ч/1150 °C/20/5  | 2009–2014     | Получены кривые многоступенчатого нагрева тонкостенных труб с выдержкой и проверкой однородности поля температур ( $\pm 7$ °C) на каждой ступени с последующим охлаждением в потоке инертного газа. Получены кривые нагрева садки заготовок в корзине с проверкой неравномерности ( $\pm 5$ °C)  |
|   | Вакуумная печь IPSEN (Австрия)   | 5 ч/1000 °C/10/2   |               |  |
| ОАО «Тихвинский вагонстроительный завод» (Тихвин, Ленинградская обл.) | Кольцевая печь CAN-ENG (Канада)  | 4 ч/1000 °C/10/1   | 2013          | Получены реальные данные о качестве термообработки колесных рам. Проверено соответствие параметров печи значениям, заявленным поставщиком  |
| ОАО «ПНТЗ» (Первоуральск)   | Печь нормализации труб SMS Meyer (Германия)  | 2 ч/600 °C/10/1)   | 2012          | Проверены показания пирометров спектрального отношения, управляющих работой печи. Определены корректирующие поправки к их показаниям   |
| ОАО «Чепецкий механический завод» (Глазов)                            | Вакуумная печь ОКБ (СССР)  | 16 ч/600 °C/20/1)  | 2013          | Получены реальные данные о качестве нагрева циркониевых трубных заготовок для атомных реакторов  |
| Technosteel (Яссы, Румыния)   | Электрическая колпаковая печь (Румыния)  | 44 ч/680 °C/13/8   | 2004–2006     | Получены реальные данные отжига стопы из шести плотно смотанных рулонов холоднокатаной стали. Увеличена производительность стенда на 15 %  |





Рис. 2. Экспериментальный сляб с установленной системой мониторинга

Кроме представленных в табл. 1 предприятий, система мониторинга температурного поля была использована и на других заводах и производствах: SSAB, Sandvik (Швеция), Voest (Австрия), Labein Tecnalia (Испания), Kardemir (Турция), Outokumpu (Финляндия), Magotteaux (США), SMS Siemag, Mannesmann Röhren, Arcelor Mittal (Германия), Arcelor Mittal (Франция), Arcelor Mittal (Люксембург).

В табл. 2 представлены параметры металла в процессе нагрева.

На рис. 3–6 приведены графики исследования печей различных предприятий с использованием системы Phoenix TM.

**Выводы**

Основные результаты проведенных исследований:

- 1) реальная температура металла существенно отличается от температуры в зонах печи, поэтому перед тем как вести управление нагревом, необходимо установить связь между действительной температурой металла и показаниями штатных термопар;



Рис. 3. Изменение температуры в контрольных точках сляба и расчетные значения математической модели

- 2) перепад температуры по металлу в процессе нагрева как по длине сляба, так и по толщине немалый и в ряде случаев достигает 481 °С, что имеет существенное значение, так как это влияет на структуру металла и качество готовой продукции;

- 3) математические модели нагрева всех исследованных печей (за редким исключением) не отражают реальной картины нагрева металла. В некоторых печах разность между расчетной и реальной температурами достигает 260 °С (причем расчетные значения всегда выше). Также не всегда ММ корректно оценивает процесс нагрева: согласно ММ, быстрее нагревается верхняя поверхность сляба, а на практике — нижняя;

- 4) подогревательная зона печи функционирует неэффективно (за редким исключением) — скорость нагрева металла в ней не превышает скорости нагрева в методической зоне, что не позволяет в полной мере использовать ее возможности;

- 5) в большинстве печей томильная зона не выполняет своей функции как зона выравнивания температуры, а работает практически как нагревательная;

| Таблица 2<br>Характеристика исследований некоторых печей, выполненных с помощью системы Phoenix TM |  |                         |                                      |  |
|--|--|-------------------------|--------------------------------------|--|
| Агрегат  | Размер заготовки, мм                           | T <sub>нагр</sub> , мин | Перепад температуры по заготовке, °С |  |
|  |  |                         | max                                  | перед выдачей  |
| Стан 450. Печь с шагающим подом (ЗП)   | 150×150*                                       | 133                     | 202,1                                | 47 (по ТИ — 30)  |
|  | 150×150*                                       | 140                     | 186,8                                | 52,8 (по ТИ — 30)  |
| Стан 2800  | Печь толкательная (ЗП)<br>(см. рис. 3)         | 270***                  | 241                                  | 85,7 (по ММ — 20)  |
|  |  | 270***                  | 241                                  | 70,8 (по ММ — 20)  |
|  |  | 270***                  | 202                                  | 87,6 (по ММ — 20)  |
|  | Печь толкательная ОП                           | 265***                  | 382                                  | 52,8 (по ТИ — 20)  |
| Стан 5000  | Печь с шагающими балками (ЗП) (см. рис. 4 и 5) | 250***                  | 255                                  | 23,8   |
|  |  | 312***                  | 437                                  | 39,2 (по ТИ — 20)  |
|  |  | 312***                  | 444                                  | 64,1 (по ТИ — 20)  |
|  | Печь проходная с транспортными тележками (ЗП)  | 250***                  | 315                                  | 60   |
|  |  | 315 (три эксперимента)  | 307–480                              | 60–177   |
|  | Камерная печь (ОП)                             | 315***                  | 1164                                 | 22 — по садке, от 4 до 11 — отдельно по слябам (достигнут через 840 мин) |
| Колесопрокатный стан.<br>Последовательный нагрев в двух печах с кольцевым подом (ОП) (рис. 7)      | 480×470**                                      | 419                     | 300,8                                | 39,2   |
|  | 350×472**                                      | 438                     | 274                                  | 23,9   |

\* — указан поперечный размер; \*\* — указаны толщина и высота; \*\*\* — указана толщина.

Примечание: ЗП — зарубежный производитель; ОП — отечественный производитель; ТИ — Технологическая инструкция

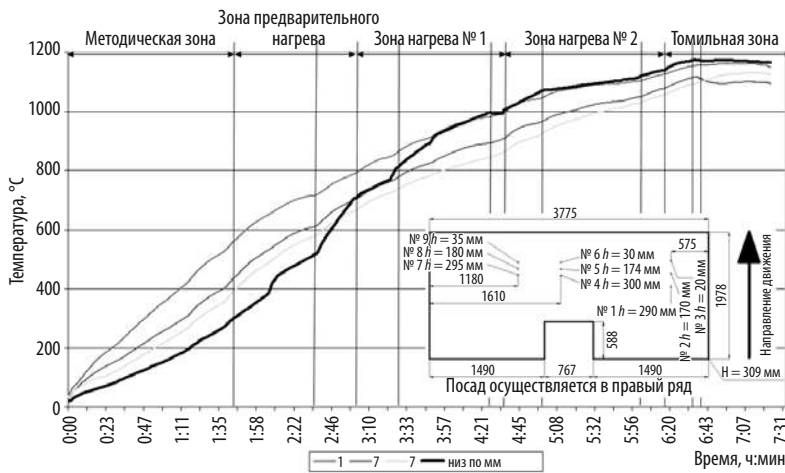


Рис. 4. График изменения температуры в трех точках нижней поверхности сляба и данные по математической модели

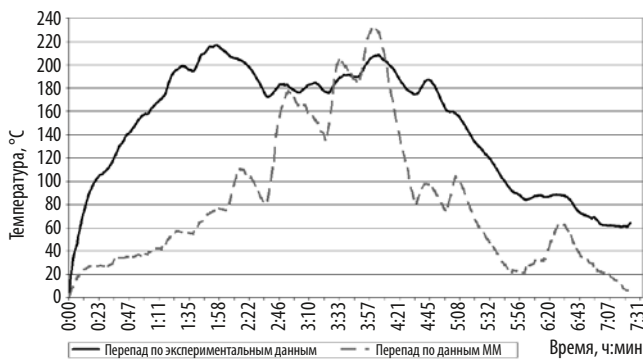


Рис. 5. График сравнения расчетного и реального изменения перепада температур по слябу в процессе нагрева сляба толщиной 315 мм

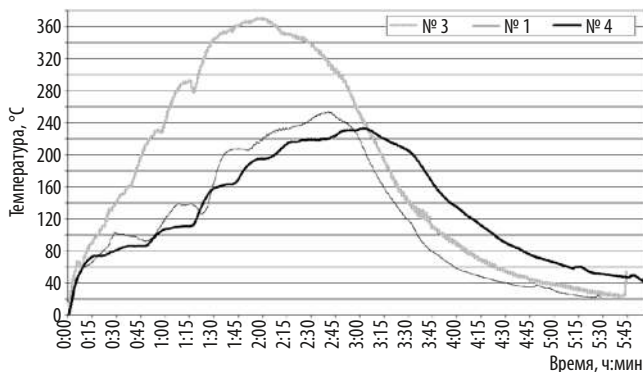


Рис. 6. Изменение абсолютного перепада температуры по слябу (№ 1 — старый режим, № 3 — новый усовершенствованный режим, № 4 — новый усовершенствованный режим с изменениями заказчика) [5]

б) зарубежные поставщики печей не раскрывают сущности ММ процесса нагрева и управления печью. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что поставляемые ММ некорректно описывают процессы, происходящие в печи, а в новых публикациях о ММ практически отсутствуют данные о результатах их промышленного внедрения [6–10];

7) авторами создана и опробована математическая модель нагрева металла, обеспечивающая достаточно

точное воспроизведение реального процесса нагрева сляба [11–14].

Совершенствование тепловой работы и конструкции НП станов горячей прокатки и ТП различных металлургических производств, а также исследование процесса нагрева металла с целью повышения качества нагрева с помощью системы Phoenix ТМ позволяют достичь следующих результатов:

- снижение максимального перепада температуры по металлу и садке как в процессе нагрева, так и на выдache;
- уменьшение количества окалины;
- сокращение удельного расхода топлива и, как следствие, снижение расхода электроэнергии на вентиляторы подачи воздуха и на привод дымососа;
- уменьшение количества выбросов в атмосферу;
- снижение стоимости затрат на ремонт и увеличение срока службы элементов печи;
- получение реальной картины нагрева металла и возможность адаптации ММ по реальным температурным данным.

Результаты выполненных исследований подтверждают важную роль промышленного изучения тепловой работы печи, поскольку каждый агрегат — это уникальное сооружение, требующее индивидуального подхода к проектированию и эксплуатации.

В заключение следует отметить, что любые затраты на систему мониторинга температуры, в том числе на расходные материалы (термопары, высокотемпературную теплоизоляцию) для проведения регулярных обследований печи, перекрываются существенным экономическим эффектом от правильно настроенного режима нагрева и термообработки. Практическое применение результатов исследований обеспечивает высокую воспроизводимость технологического процесса в металлургическом печном агрегате, а значит, и качество конечного продукта. При этом энергетические затраты на нагрев оптимизируются, и реальное снижение удельного расхода топлива может достигать 4–10 %.

При годовом производстве 5 млн т, стоимости природного газа 4 тыс. р/тыс. м<sup>3</sup> и удельном расходе топлива 45–50 кг у. т/т стоимость необходимого природного газа составит 40/1,14·4 000/1 000·5 000 000 ≈ 789,5÷877,2 млн р. При снижении расхода газа на 4 % экономия составит ~31,6–35,1 млн р/год, причем без учета экономии электроэнергии, увеличения выхода годного и более длительного межремонтного срока. Затраты на покупку системы и проведение работ не превышают 4–7 млн р.

На ряде зарубежных предприятий не реже двух раз в год проводят эксперимент по получению реальных кривых нагрева слябов с последующей корректировкой тепловой работы печного агрегата. ■

Библиографический список

1. Кривандин В. А., Егоров А. В. Тепловая работа и конструкция печей черной металлургии. — М.: Металлургия, 1989. — 462 с.
2. Бельский А. М., Дубинский М. Ю., Калимулина С. И. Промышленный эксперимент — основа проведения энергосберегающей политики в металлургической теплотехнике // Металлур. 2010. № 5. С. 26–29.
3. Plester D., Taake M. Ten practical tips for ensuring accurate data from reheat profiling // Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология (15–20 октября 2012, Москва). Тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. — М.: МИСиС, 2012. С. 384–391.
4. Ulanovskiy A. A., Zemba E. S., Belenkiy A. M., Chibizova S. I., Bursin A. N. Stability of Cable Thermocouples at the Upper Temperature Limit of their Working Range of Temperature // 9<sup>th</sup> Int. Temperature Symposium, Los Angeles USA, 2012 AIP Conference Proceedings. P. 576–580.
5. Негреев А. Н., Чеботов В. М., Кадошников А. А. и др. Совершенствование тепловой работы нагревательных печей стана 5000 ПТЛ ОАО «ММК» // Тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей. — М.: МИСиС, 2016. С. 158–166.
6. Lingyan Hu, Kai Tang. Analysis of Billet Thermal Behavior and Temperature Setting Optimization in a Walking Reheat Furnace // ISIJ International. 2017. Vol. 57. No. 10. P. 1838–1846.
7. Guangwu Tang, Bin Wu, Dengqi Bai et al. Numerical simulation of a walking beam slab reheating furnace // Iron & Steel Technology. 2017. No. 3. P. 78–88.
8. Zaludova M., Smetana B., Zla S., Dubrovskaja J., Matejka V. Latent heats of phase transformations of steel in low temperature region // Proceedings of 20-th International Metallurgical and Materials Conference «Metal-2011». 2011. May 18–20. Brno, Czech Republic. P. 732–737.
9. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V. A Heat Transfer Textbook — Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2008. — 762 p.
10. Schubert C., Eickhoff M., Rückert A., Pfeifer H. Process Model Development for Reheating Plants using simple Numerical Methods enhanced with CFD Results // 3rd European Conference Steel Technology & Application Days (ESTAD). 2017. At Vienna, Austria. P. 95–104.
11. Aruytyunov V. A., Levitskii I. A., Ibadullaev T. B. Development of methods for mathematical modeling of thermophysical processes in industrial fuel furnaces // Metallurgist. 2011. Vol. 55, No. 1–2. P. 3–9.
12. Арутюнов В. А., Бухмиров В. В., Крупенников С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. — М.: Металлургия, 1990. — 239 с.
13. Бельский А. М., Бурсин А. Н., Левицкий И. А. и др. Структура математической модели тепловой работы методической печи с шагающими балками // Тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. — М.: МИСиС, 2018. С. 60–70.
14. Денкер Й., Цандер Д., Гетше М. Концепция управления ходом печи 4.0 — гибкая система управления действующими печными агрегатами // Черные металлы. 2018. № 6. С. 42–45.

“CHERNYE METALLY”, 2019, № 9, pp. 54–60

USING A PHOENIX TM AUTONOMOUS AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING TEMPERATURE FIELD OF METAL TO BE HEATED IN METALLURGICAL FURNACES

A. A. Ulanovskiy<sup>1</sup>, Cand. Eng., Director,  
 M. Taake<sup>2</sup>, Director,  
 A. M. Belenkiy, Dr. Eng., General Director,  
 A. N. Bursin, Engineer, Senior Researcher,  
 S. I. Chibizova<sup>4</sup>, Cand. Eng., Associate Prof., Dept. “Power-efficient and resource-saving industrial technologies”

<sup>1</sup>Obninsk Thermoelectrical company (Obninsk, Russia)  
<sup>2</sup>Phoenix TM GmbH (Bad Oeynhausen, Germany)  
<sup>3</sup>“Innovation and power saving” company (Moscow, Russia)  
<sup>4</sup>National University of Science and Technology “MISIS” (Moscow, Russia)  
 E-mail: energomet@misiss.ru

An energy-efficient technological process in heating furnaces is aimed at ensuring the optimal temperature mode in a working space of the unit. The main parameter of the process, the actual temperature of the metal, is practically not controlled in furnaces. The furnace management is carried out by the readings of zonal thermocouples, which do not accurately monitor the thermal and temperature state of the metal to be heated in the unit. To ensure the specified quality of heating and heat treatment of the metal, it is necessary to know the actual change in its temperature depending on the thermophysical characteristics of the material, the speed of advancement through the unit, and the readings of the furnace instrumentation industrial control system.

The methodology to study industrial units based on the Phoenix TM company automated system has been described, which made it possible to improve heating processes at foreign and domestic enterprises in 1999–2018.

**Keywords:** metallurgical furnace unit, temperature mode, monitoring system, Phoenix TM, directed industrial experiment, improving the quality of heating.

References:

1. Krivandin V. A., Egorov A. V. Thermal work and design of furnaces of ferrous metallurgy. Moscow: Metallurgiya, 1989. 462 p.
2. Belenkiy A. M., Dubinsky M. Yu., Kalimulina S. I. Industrial experiment is a basis to realize energy-saving policy in metallurgical heat engineering. *Metallurg*. 2010. No. 5. pp. 26–29.
3. Plester D., Taake M. Ten practical tips for ensuring accurate data from reheat profiling. *Energy-saving technologies in industry. Furnace units.*

*Ecology (15–20 October 2012, Moscow). Proceedings of the VI International scientific and practical conference. Moscow: MISIS, 2012. pp. 384–391.*

4. Ulanovskiy A. A., Zemba E. S., Belenkiy A. M., Chibizova S. I., Bursin A. N. Stability of Cable Thermocouples at the Upper Temperature Limit of their Working Range of Temperature. *9<sup>th</sup> Int. Temperature Symposium, Los-Angeles USA, 2012 AIP Conference Proceedings*. pp. 576–580.
5. Negreev A. N., Chebotov V. M., Kadoshnikov A. A. et al. Improvement of heat work of heating furnaces of the JSC MMK 5000 mill. *Proceedings of the VIII International scientific and practical conference. Energy-efficient and resource-saving technologies in industry. 100 years of domestic designing metallurgical furnaces. Moscow: MISIS, 2016. pp. 158–166.*
6. Lingyan Hu, Kai Tang. Analysis of Billet Thermal Behavior and Temperature Setting Optimization in a Walking Reheat Furnace. *ISIJ International*. 2017. Vol. 57. No. 10. pp. 1838–1846.
7. Guangwu Tang, Bin Wu, Dengqi Bai et al. Numerical simulation of a walking beam slab reheating furnace. *Iron & Steel Technology*. 2017. No. 3. pp. 78–88.
8. Zaludova M., Smetana B., Zla S., Dubrovskaja J., Matejka V. Latent heats of phase transformations of steel in low temperature region. *Proceedings of 20-th International Metallurgical and Materials Conference «Metal-2011»*. 2011. May 18–20. Brno, Czech Republic. pp. 732–737.
9. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V. A Heat Transfer Textbook Cambridge, MA: Phlogiston Press, 2008. 762 p.
10. Schubert C., Eickhoff M., Rückert A., Pfeifer H. Process Model Development for Reheating Plants using simple Numerical Methods enhanced with CFD Results. *3rd European conference Steel Technology & Application Days (ESTAD)*. 2017. At Vienna, Austria. pp. 95–104.
11. Aruytyunov V. A., Levitskiy I. A., Ibadullaev T. B. Development of methods for mathematical modeling of thermophysical processes in industrial fuel furnaces. *Metallurgist*. 2011. Vol. 55, No. 1–2. pp. 3–9.
12. Aruytyunov V. A., Bukhmirov V. V., Krupennikov S. A. Mathematical modeling heat work of industrial furnaces. Moscow: Metallurgiya, 1990. 239 p.
13. Belenkiy A. M., Bursin A. N., Levitskiy I. A. et al. Structure of the mathematical model of heat work of continuous furnace with walking beams. *Proceedings of the IX International scientific and practical conference. Energy-efficient and resource-saving technologies in industry. Moscow: MISIS, 2018. pp. 60–70.*
14. Denker J., Zander D., Gottsche M. Flexible control and managing system 4.0 for furnaces. *Chernye Metally*. 2018. No. 6. pp. 42–45.