УДК 621.771.016.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ СТАНОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

А. М. БЕЛЕНЬКИЙ[1], д-р техн. наук; А. Н. БУРСИН[2], А. А. УЛАНОВСКИЙ[3], С. И. ЧИБИЗОВА[1]
([1] НИТУ "Московский институт стали и сплавов",
[2] ООО "Инновации и энергосбережение", г. Москва;
[3] ООО "Обнинская термоэлектрическая компания")

При всей важности высокотехнологического сектора основой нашей экономики останутся базовые отрасли промышленности, такие как ТЭК и металлургия. В макроэкономическом подходе металлургию, особенно ее экспортный потенциал, принято рассматривать вместе со сферой ТЭК, а металлопродукцию включать в один ряд с нефтью, природным газом и углем. Но, по мнению специалистов, наладить выпуск, допустим, цифровых фотокамер может гораздо большее количество стран по сравнению с теми, кто способен производить высококачественную легированную сталь или создавать жаростойкие сплавы для турбинных лопаток авиадвигателей. Металлургическая отрасль всегда была создателем и полигоном инноваций. Достаточно вспомнить, что использование кислорода, водорода, азота, аргона в криогенных технологиях, которые сегодня распространены во многих сферах — от космической техники до медицины, в промышленных масштабах впервые было применено для целей металлургии, в частности при получении сверхчистых металлов. Главным конструкционным материалом XXI в., а может быть и всего наступившего тысячелетия, останется сталь.

Сформулированный тезис подтверждается данными о развитии черной металлургии в мире. Ни одна отрасль не развивается такими темпами. В 2004 г. мировая выплавка стали впервые превысила 1 млрд т и составила 1050 млн т. В 2013 г. выплавлено 1607 млн т стали. Таким образом, с 2004 по 2013 г. мировое производство стали возросло на 557 млн т, или на 53 %, т. е. ежегодный прирост составил 5,3 %.

В России металлургическая отрасль в целом и черная металлургия в частности является стратегическим национальным ресурсом. Фактически эта отрасль в нашей стране является не только градообразующей, но и, можно сказать, государствообразующей. Машиностроение, железнодорожный, морской и автомобильный транспорт, дороги и мосты, трубопроводный транспорт нефти и газа, строительные конструкции немыслимы без стали, а в нашей стране из-за ее протяженности, сурового климата, громадных сырьевых и энергетических богатств металлургия является становым хребтом не только промышленности, но и самого государства.

Энергоемкость экономики пяти стран (кг нефтяного эквивалента/1000 долл.) в 2008 г. составила: Россия — 327,6; Китай — 279,7; Индия — 195,9; США — 173,5; Япония — 124,0. Таким образом, в нашей стране значительно более высокие затраты энергии на производство, причем мы отстаем и от Китая, и от Индии, а по отношению к Японии наш удельный расход энергии в 2,6 раз выше. Повышение энергоэффективности в России приобретает статус критического условия для дальнейшего существования и развития, что и сформулировано в Государственной программе РФ "Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2030 г.", которой предусмотрено сэкономить за 2011–2020 гг. 1124,16 млн т у.т., т. е. около 787 млн т нефтяного эквивалента. Это больше, чем годовое потребление нефти всей страной.

Металлургия России имеет существенные резервы снижения затрат основных производственных ресурсов, особенно за счет повышения энергоэффективности металлургических печных агрегатов (МПА), являющихся главным технологическим оборудованием фактически на всех переделах. В настоящее время в черной металлургии насчитывается более 3000 крупных МПА, в том числе более 400 нагревательных печей, около 70 агрегатов непрерывного отжига, свыше 2000 колпаковых печей и т. д. Эффективность их работы определяет удельные материальные и энергетические затраты, качество готовой про-

дукции и в конечном счете объем получаемой прибыли.

Основными МПА являются нагревательные печи станов горячей прокатки. Это практически единственный агрегат в металлургическом производстве, через который проходит вся выплавленная в мире сталь. От его функционирования зависит конечное качество металла и энергоэффективность производства горячекатаного металла, в первую очередь листовой продукции, объем производства которой в передовых металлургических странах превышает 75 % всего выпуска металла, проходящего станы горячей прокатки.

Черная металлургия СССР была оснащена эффективными отечественными МПА данного типа, причем они были также построены нашими специалистами и за рубежом: в Китае, Индии, Пакистане, Египте, Алжире, Нигерии, ГДР, Польше, Болгарии и других странах. Однако после 1991 г. в России не создано ни одной крупной печестроительной фирмы, которая могла бы составить конкуренцию западным производителям данного оборудования, поставляющим его в нашу страну по весьма высоким ценам.

В нашей стране в черной металлургии при исследовании тепловой работы МПА широко применяются методы измерения температуры металла, кладки и атмосферы в рабочем пространстве печи. На базе системы мониторинга режимов нагрева металла с помощью автономного регистратора температуры (АРТ) созданы и отработаны методики эффективного изучения тепловой работы печей станов горячей прокатки и получены результаты, раскрывающие реальную картину процессов в печах и позволяющие существенно улучшить их функционирование [1–12]. Следует отметить, что в партнерстве с фирмой Phoenix TM, Великобритания, созданы уникальные устройства для установки и защиты электронных регистрирующих систем, устанавливаемых на заготовке и находящихся в печи значительное время при высоких температурах. На рис. 1 и 2 показаны некоторые конструкции систем, использованных при изучении температурных режимов нагрева металла в печах станов горячей прокатки. Современные АРТ оснащены системами радиотелеметрии, что позволяет получать данные в режиме реального времени в темпе с процессом и, по мнению авторов, дает беспрецедентную возможность улучшения качества нагрева и управления печным агрегатом.

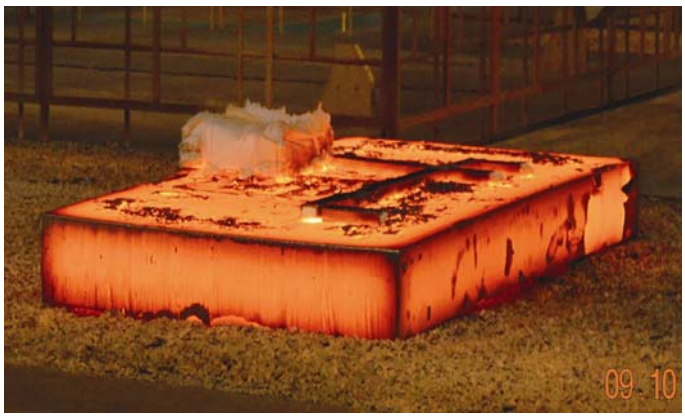

Рис. 1. *Система АРТ на выходе из нагревательной печи прокатного стана*

Рис. 2. *Система АРТ на выходе из кольцевой нагревательной печи*

Как показали исследования, выполненные за последние пять–семь лет, в целом печное оборудование, поставляемое фирмами из Германии, Франции, Италии и Бельгии (LOI, CMI, Danieli, Fives Stein) характеризуется положительно: низкий удельный расход топлива, пониженное окалинообразование и уменьшенные выбросы оксидов азота, качественное информационное сопровождение управления процессом нагрева. Однако они имеют и существенные недостатки, которые, в частности, проявляются в том, что не полностью подтверждаются параметры функционирования, заявляемые поставщиками, в том числе и по качеству нагрева, необходимого для эффективной работы станов горячей прокатки, и изготовления металла высшего качества, например, для магистральных газопроводов высокого давления.

В таблице приведены данные о некоторых выполненных с помощью АРТ исследованиях температурных режимов нагревательных печей

отечественного и зарубежного производства. Всего на станах горячей прокатки металлургических заводов и комбинатов России за 2000–2013 гг. выполнено более 55 пропусков систем АРТ различных типов. Из приведенных данных следует, что практически на всех печах не обеспечивается достижение декларированных поставщиком печей величин перепадов температуры в нагретой заготовке перед ее выдачей из печи. Отклонение данного параметра нагретого металла от заданного значения достигает весьма значительных величин (от 5–10 до 30–50 °С).

На рис. 3–8 представлены результаты исследований, которые позволили сделать обоснованные выводы о работе данных агрегатов и сформулировать предложения об улучшении их работы. Следует отметить, что математические модели неадекватно описывают реальный температурный режим нагрева металла (см. рис. 3–5). При нагреве металла на стане 2800 математическая модель завышает температуру верхней поверхности сляба практически на 200 °С. Кроме того, по модели более быстро греется верхняя поверхность сляба, а на самом деле быстрее греется нижняя поверхность. Максимальный перепад температур по слябу в процессе нагрева может превысить 300 °С, а перед выдачей — 70–80 °С, что совершенно недопустимо с точки зрения технологии нагрева и прокатки.

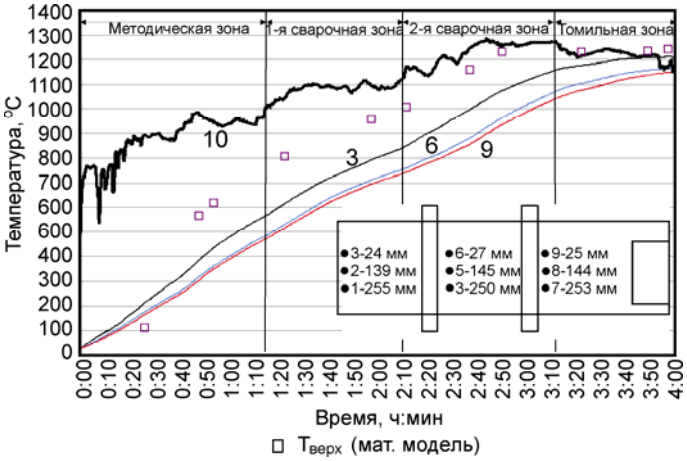

Рис. 3. *График изменения температур поверхности сляба в процессе нагрева, стан 2800*

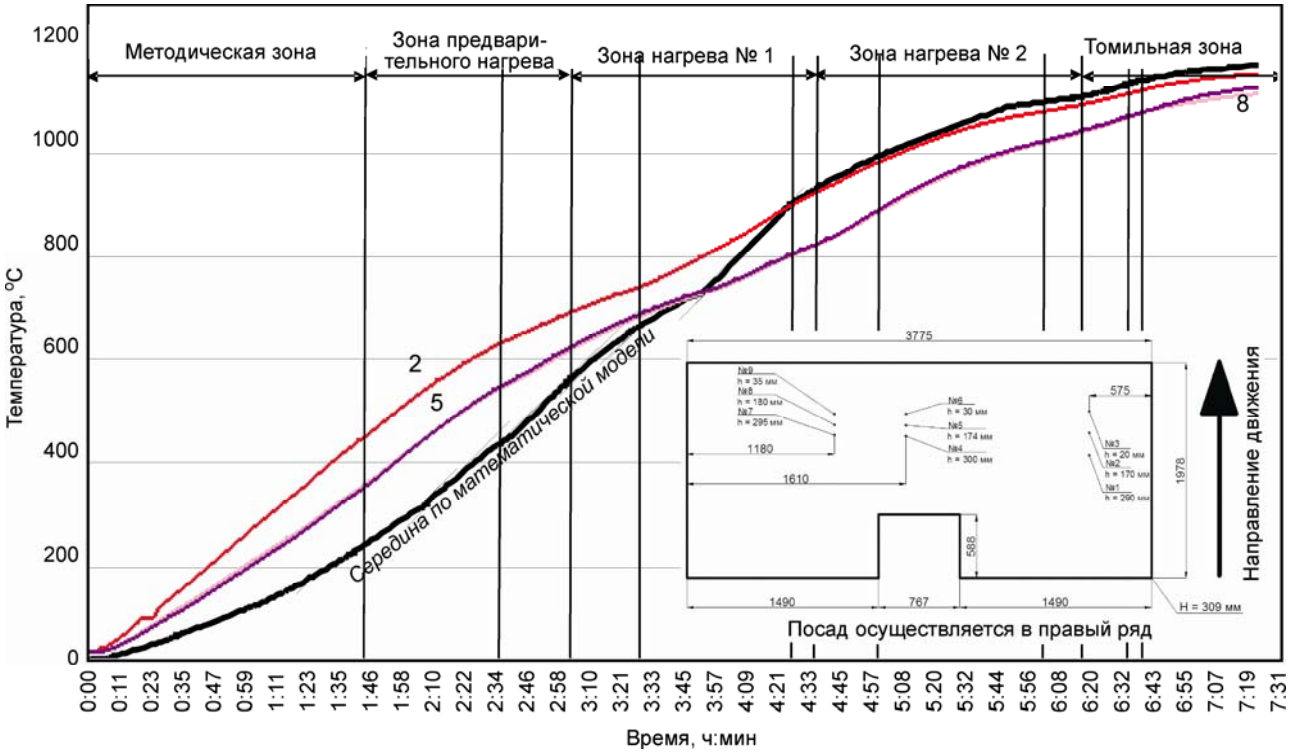

Рис. 4. *График изменения температур в среднем горизонтальном сечении сляба в процессе нагрева, стан 5000*

ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЙ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНОГО РЕГИСТРАТОРА ТЕМПЕРАТУР (АРТ)

Агрегат		Толщина заготовки, мм	Длительность нагрева, мин	T_{max} в печи по показаниям штатных приборов, °С	T max поверхности заготовки, °С	Перепад температуры по длине заготовки (верхняя поверхность), °С		Общий перепад температуры по заготовке, °С	
						максимальный	перед выдачей	максимальный	перед выдачей
Стан 450. Печь — проходная, с шагающим подом (ЗП)		150×150	133	1300	1220	69,1	14,9	202,1	47 (по ТИ — 30)
		150×150	140		1215	59,7	9,5	186,8	52,8 (по ТИ — 30)
Стан 2000. Печь — проходная, с шагающими балками (холодный экспериментальный сляб находился внутри горячего посада) (ОП)		250	243	1400	1240	277	7	307	68
Стан 2800. Печь — проходная, толкательная	ЗП	270	241	—	1213,1	97,9	56,6	281,4	85,7 (по ММ — 20)
		270	241		1214,9	144	58,2	234,8	70,8 (по ММ — 20)
		270	202		1202,1	139,5	69,7	314,1	87,6 (по ММ — 20)
	ОП	265	382	1300	1219,4	95,5	30,8	175,4	52,8 (по паспорту — 20)
Стан 5000	Печь — проходная с шагающими балками (ЗП)	250	255	—	1219,2	164,1	15,6	249,1	23,8*
		312	437	1250	1158 (по ТИ — 1170)	80	9,6 (по ТИ — 10)	167,3	39,2 (по ТИ — 20)
		312	444		1161,5 (по ТИ — 1170)	73,9	21,2 (по ТИ — 10)	216,5	64,1 (по ТИ — 20)
	Печь — проходная с транспортными тележками (ЗП)	250	315	1250	1213	31	31	279	60
		315	415		1241	120	37	391	80
		315	480		1255	176	12	481	60
		315	307		1234	134	70	466	177
	Камерная печь (ОП)	315	1164 (фактически садка была готова к выдаче через 840 мин)	1250	1214	—	—	276	22 — по садке; от 4 до 11 — отдельно по слябам
Колесопрокатный стан. Печи с кольцевым подом (последовательный нагрев в двух печах) (ОП)		480×470	419	1280	1283,8 (по ТИ — 1270)	190,3	27	300,8	39,2
		350×472	438		1278,8 (по ТИ — 1270)	195	7	274	23,9

* *Перепад мог быть и выше, если хотя бы одно из сечений находилось над водоохлаждаемой балкой.*

Приложение: ММ — математическая модель; ТИ — технологическая инструкция; ЗП — печь зарубежного производства; ОП — печь отечественного производства.

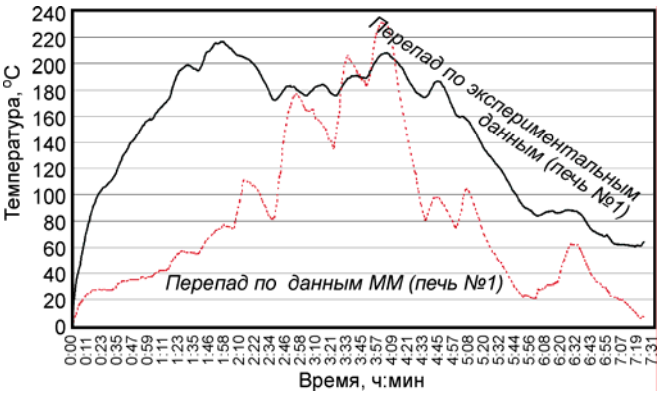

Рис. 5. *Сравнение расчетного и реального изменения перепада температур по слябу в процессе нагрева, стан 5000*

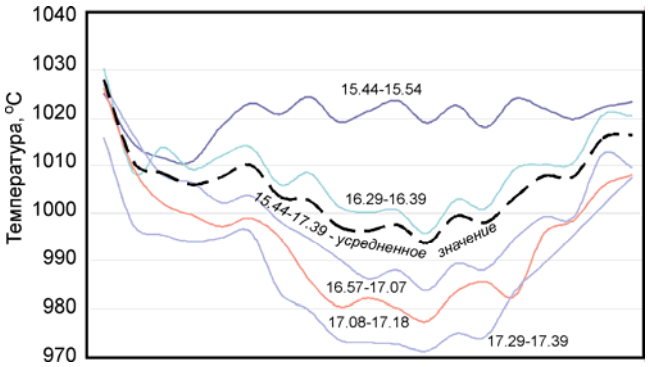

Рис. 6. *Изменение температуры по длине заготовок перед станом*

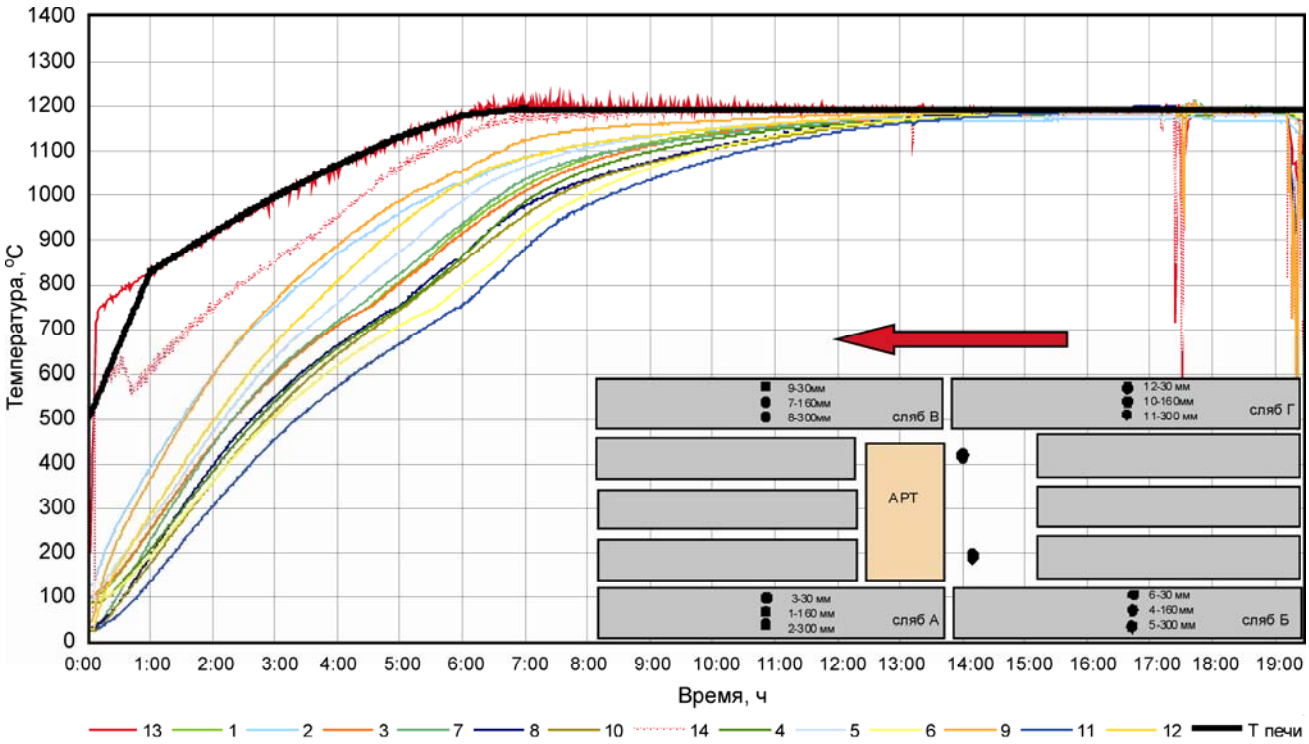

Рис. 7. *График изменения температур слябов в стопе в процессе нагрева в камерной печи*

Аналогичная картина наблюдается при нагреве металла на стане 5000 (см. рис. 4, 5). Математическая модель неадекватно описывает процесс нагрева сляба. В качестве примера показана ситуация с определением температуры в трех точках в среднем горизонтальном сечении заготовки. То же самое имеет место для верхней и нижней поверхностей сляба. Недостатки модели подчеркиваются и графиками изменения реального и расчетного максимального перепада температур по слябу в процессе его продвижения через печь (см. рис. 5). Такой характер изменения данного параметра массивного металла, как это следует из расчетов по математической модели, практически не может быть осуществлен в реальности.

Графики на рис. 6 иллюстрируют изменение температур по длине заготовки сортового стана в процессе работы печного агрегата за 2 ч непрерывной работы. Каждая кривая получена усреднением значений температуры, измеряемой пирометром излучения перед станом в 16 точках по длине заготовки. Обработаны данные по 110 заготовкам. На рис. 6 представлены данные по 50 заготовкам, а также усредненные значения температур по всем 110 заготовкам. Полученные данные свидетельствуют о том, что металл в печи греется неравномерно — температура средней части может отличаться от более нагре-

тых переднего и заднего концов заготовки на 25–35 °С. Видно, что в процессе выдачи металла на стан температура заготовок постепенно снижается, хотя температуры в зонах печи поддерживаются регуляторами на постоянном уровне. Последний факт подтверждает вывод о том, что зональные термопары недостаточно точно отслеживают реальную температуру металла в печи и необходимо вводить коррекцию на основе измерений пирометра, установленного на стане, что в настоящее время не производится. Следует также отметить, что на стыках подвижных балок происходит заметное охлаждение нижней поверхности заготовки.

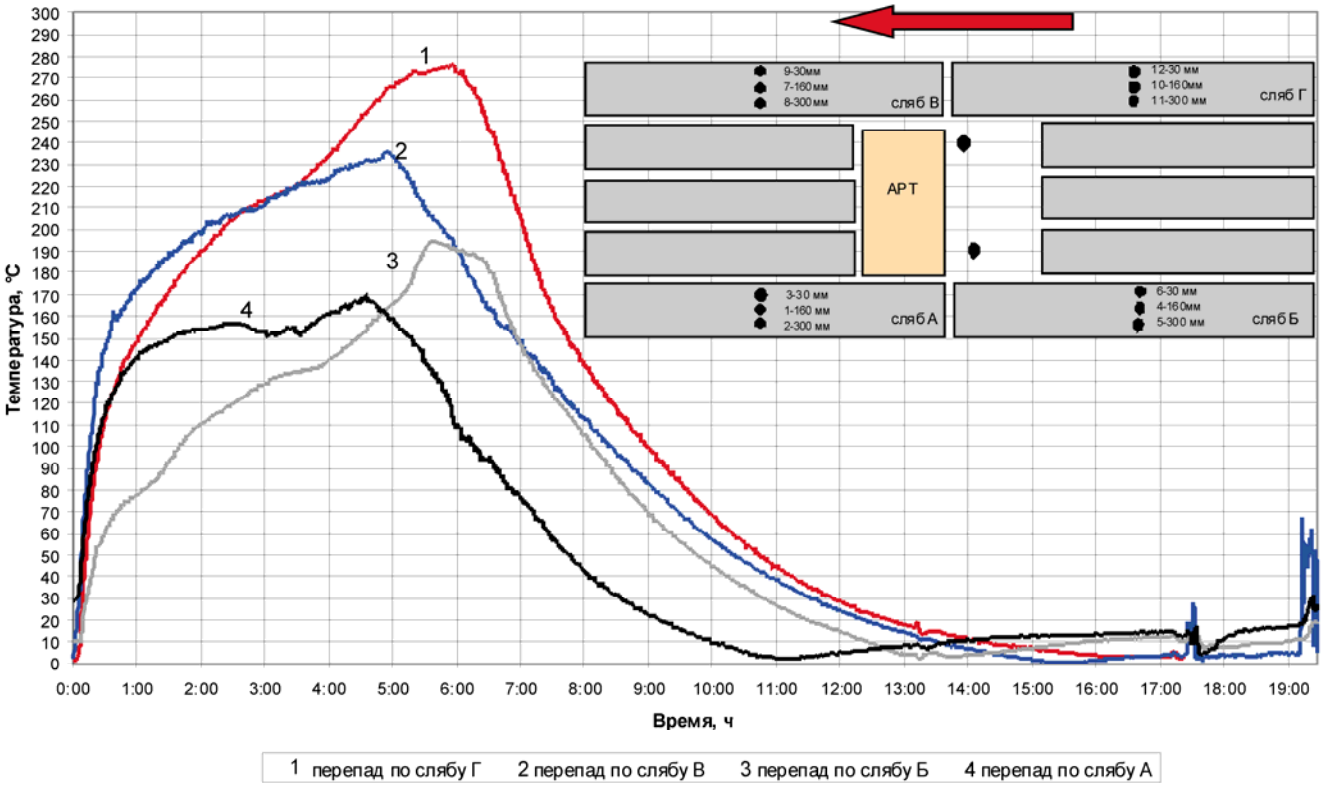

Рис. 8. *График изменения перепада температур в слябах в стопе в процессе нагрева в камерной печи*

На рис. 7 и 8 представлены данные исследования процесса нагрева массивного металла в камерных печах. Уникальная система АРТ позволила обеспечить работоспособность измерительной системы в печи в течение 20 ч при температурах до 1250 °С [3]. Металл прогревается хорошо — вся садка имеет перепад температур 22 °С, а в контролируемых слябах неравномерность еще меньше — от 4 до 11 °С. Из полученных данных следует, что длительность нагрева по технологической инструкции сильно завышена, и процесс может быть завершен раньше. Увеличение времени пребывания слябов в печи приводит к значительным потерям металла с окалиной и большому перерасходу топлива.

В результате определения реальных режимов нагрева металла в печах станов горячей прокатки сформулированы и внедрены предложения по совершенствованию технологических карт нагрева металла (изменены задания зональным регуляторам температуры), внесены изменения в отдельные элементы. В конечном итоге улучшилась управляемость агрегатов, уменьшился удельный расход топлива, повысилось качество нагрева. На кольцевых печах колесопрокатного стана снижен расход топлива на 8–10 %.

Проведенные комплексные исследования позволили констатировать, что существующие нагревательные печи станов горячей прокатки как отечественного, так и зарубежного производства имеют ряд принципиальных недостатков:

– невозможность обеспечения высокой равномерности прогрева металла, так как на нижней поверхности сляба остаются недостаточно прогретые места — “темные пятна”, являющиеся следствием воздействия водоохлаждаемых элементов транспортирующей системы печи;

– несимметричность температурного поля сляба по толщине вследствие разных условий нагрева сляба сверху и снизу: сляб греется быстрее либо сверху, либо снизу, причем определить реальный характер нагрева и исключить

данный недостаток конструкции практически невозможно;

– неравномерность температурного поля сляба по длине вследствие разных условий нагрева металла по ширине печи, достигающей 8–12 м;

– значительные удельные расходы топлива на нагрев металла, так как необходимо затрачивать тепло на весьма обширную водоохлаждаемую систему транспортировки металла в печи;

– значительные потери тепла при открывании окон посада и выдачи;

– достаточно большие потери металла с окалиной вследствие длительного пребывания металла в печи, особенно это относится к станам 5000, на которых ведется прокатка слябов толщиной до 400 мм;

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

В настоящее время в России созданы предпосылки, которые могут существенно улучшить создавшуюся ситуацию: разработаны современные горелочные устройства, рекуператоры, новые типы колпаковых и камерных печей, созданы адекватные математические модели и т. д.

Предлагается создать научно-промышленный кластер “Инновационные технологии прокатного производства черной металлургии”, который должен решать следующие научно-технические задачи:

– снижение зависимости от зарубежных поставщиков высокотехнологического металлургического оборудования;

– восстановление печестроения в стране — уход от западного производителя оборудования;

– создание энергоэффективного печного оборудования и систем управления для металлургической промышленности, машиностроения, в том числе атомного, где нельзя допускать ориентацию на зарубежное оборудование, в то же время необходимо учитывать самые перспективные достижения мировой науки и техники;

– создание принципиально новых научно-технических методов решения задач повышения энергоэффективности работы высокотемпературного и высокопроизводительного отечественного печного оборудования. На разработанной основе необходимо создание базовых технологий и комплексов интеллектуальных технических систем, обеспечивающих новый уровень управляемости и безопасности основного печного оборудования указанных отраслей промышленности;

– создание конкурентоспособного оборудования для экспорта на мировые рынки;

– повышение загрузки отечественных металлургических и промышленных предприятий;

– создание новых рабочих мест.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Совершенствование тепловой работы печей стана 2000 ОАО ММК / А. М. Беленький, Е. А. Болтенкова, М. Ю. Дубинский, В. Н. Партин: в сб. Трудов III Междунар. научно-технич. конф. “Металлургическая теплотехника: история, настоящее и будущее. К 100-летию со дня рождения М.А. Глинкова”. Москва, МИСиС. 1–3 февраля 2005 г. — М.: МИСиС. 2006. С. 152–156.
2. Современные методы и средства контроля температурных режимов работы печных агрегатов / А. М. Беленький, А. Н. Бурсин, А. В. Кадушкин, С. И. Калимулина: в сб. Трудов IV Междунар. научно-технич. конф. “Печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии и машиностроении”. Москва, 3–4 апреля 2008 г. — М.: МИСиС. 2008. С. 62–67.
3. Пат. 2357217 РФ на изобретение. Устройство для измерения температуры нагрева объекта в металлургических печах и способ работы устройства / А. М. Беленький, А. Н. Бурсин, М. Ю. Дубинский, С. И. Калимулина. 2009. Бюл. № 15.
4. Улановский А. А., Тааке М. Контроль высокотемпературной термической обработки стального проката // Сталь. 2008. № 11. С. 114–118.
5. Улановский А. А., Тимофеев Л. И. Современные системы диагностики для повышения тепловой эффективности печей термообработки // MetalRussia. 2010. Март. С. 8–11.
6. Plester D., Taake M. Ten practical tips for ensuring accurate data from slab reheat profiling: В сб. Трудов VI Междунар. научно-практич. конф. “Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология”. Москва, МИСиС. 15–20 октября 2012 г. — М.: МИСиС. 2012. С. 384–391.
7. Исследование тепловой работы нагревательных печей стана 5000 / Н. Б. Скорохватов, С. В. Сосин, О. А. Кожевникова и др.: в сб. Трудов IV Междунар. научно-технич. конф. “Печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии и машиностроении”. Москва, МИСиС. 3–4 апреля 2008 г. — М.: МИСиС. 2008. С. 328–333.
8. Беленький А. М., Дубинский М. Ю., Калимулина С. И. Промышленный эксперимент — основа проведения энергосберегающей политики в металлургической теплотехнике // Металлург. 2010. № 5. С. 26–29.
9. Улановский А. А., Беленький А. М. Повышение эффективности нагревательных печей станов горячей прокатки: в сб. Трудов VI Междунар. научно-практич. конф. “Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология”. Москва, МИСиС. 15–20 октября 2012 г. — М.: МИСиС. 2012. С. 471–484.