

10. Дель Г. Д., Новиков Н. А. Метод делительных сеток. — М.: Машиностроение. 1979. — 144 с.
11. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов в 2 т. Физико-механические основы пластической деформации. — М.: Металлургия. 1960. — 376 с.
12. Перлин И. Л. Теория прессования металлов. — М.: Металлургия. 1964. — 423 с.
13. Зибель Э. Обработка металлов в пластическом состоянии. Теоретическое обоснование процессов обработки металлов давлением: Учебник для металлург. вузов / Пер. с нем. П. С. Наумова. — Свердловск: ОНТИ по черной и цветной металлургии. 1934. — 200 с.
14. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. — М.: Металлургия. 1986. — 688 с.
15. Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Пер. с англ. Е. П. Унксова. — М.: Машиностроение. 1969. — 504 с.
16. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: В 3-х т. 8-е. изд., перераб. и доп. — М.: Физматлит. 2001. Т. 2. — 864 с.
17. Чижиков Ю. М. Теория подобия и моделирование процессов обработки металлов давлением. 1970. — 296 с.

## Экология и ресурсосбережение

УДК 621.771

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ СТАНА 5000 ПТЛ ОАО ММК

*А. Н. НЕГРЕЕВ<sup>1</sup>, В. М. ЧЕБОТОВ<sup>1</sup>, А. А. КАДОШНИКОВ<sup>1</sup>,  
А. М. БЕЛЕНЬКИЙ<sup>2</sup>, д-р техн. наук; А. Н. БУРСИН<sup>3</sup>, А. А. УЛАНОВСКИЙ<sup>4</sup>,  
С. И. ЧИБИЗОВА<sup>2</sup>, канд. техн. наук  
(<sup>1</sup> ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат”,  
<sup>2</sup> ФГАОУ ВО “Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”,  
<sup>3</sup> ООО “Инновации и энергосбережение”,  
<sup>4</sup> ООО “Обнинская термозлектроическая компания”)*

При всей важности высокотехнологического сектора основой нашей экономики останутся базовые отрасли промышленности, такие как ТЭК и металлургия. Металлургическая отрасль в целом и черная металлургия в частности в России 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 стеновым хребтом не только промышленности, но и самого государства.

Металлургия России имеет существенные резервы снижения затрат основных производственных ресурсов, особенно за счет повышения энергоэффективности металлургических печных

агрегатов, являющихся главным технологическим оборудованием фактически на всех переделах. Основными печными агрегатами в металлургии 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.

Научно-исследовательские работы по совершенствованию тепловой работы нагревательных печей станов горячей прокатки в нашей стране проводятся достаточно широко, что приводит к повышению эффективности функционирования этого важного печного агрегата и станов горячей

прокатки, а также к повышению качества готовой продукции.

В данной статье представлены результаты работы, проведенной в рамках "Раздела VI. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика. Пункт 4. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии. Подпункт 8. Разработка систем рационального использования энергоресурсов и комплексного использования вторичных энергоресурсов" "Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок, расходы налогоплательщика на которые в соответствии с п. 2 ст. 262 ч. 2 НК РФ включаются в состав прочих расходов в размере фактических затрат с коэффициентом 1,5", утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 № 988 (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 6 февраля 2012 г. № 96). В ходе работы исследованы температурные и тепловые режимы работы нагревательных печей стана 5000 ПТЛ ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат", проведен анализ существующей ситуации и выработаны рекомендации по совершенствованию тепловой работы и конструкции указанных печных агрегатов. В ходе исследования проведены опытные пропуски экспериментальной заготовки с надежной и точной автономной автоматизированной системой определения реального температурного режима нагрева металла фирмы Phoenix TM, Великобритания.

Компания Phoenix TM имеет огромный опыт работ в данном направлении и является одним из ведущих мировых изготовителей таких систем. Основная их особенность заключается в том, что электронный регистратор данных находится внутри печи (или проходит через нее) и защищен от воздействия высокой температуры высокоэффективным термозащитным контейнером. С помощью кабельных термопар, подключенных к регистратору и выведенных из контейнера, проводится измерение температуры в контрольных точках сляба для определения его температурного поля на предмет соответствия технологическим стандартам, а также температуры атмосферы печи над металлом в течение всего процесса нагрева.

Таким образом, использование данной системы обеспечивает быстрое получение надежных данных о температурных режимах оборудования, необходимых для системы контроля качества, ведения энергоэффективного процесса в

печи и процесса прокатки на стане, а также обеспечения безопасности технологического процесса.

Системы контроля процессов в печи являются модульными и могут конфигурироваться в зависимости от характеристик процесса и требований заказчика.

Система включает:

- электронный автономный регистратор температур (рис. 1);
- теплозащитный контейнер (см. рис. 1);
- комплект радиотелеметрии с антеннами и радиоповторителями;
- программное обеспечение;
- рулон высокотемпературной теплоизоляции;
- гибкие термоэлектрические термометры (см. рис. 1);
- дополнительные принадлежности.

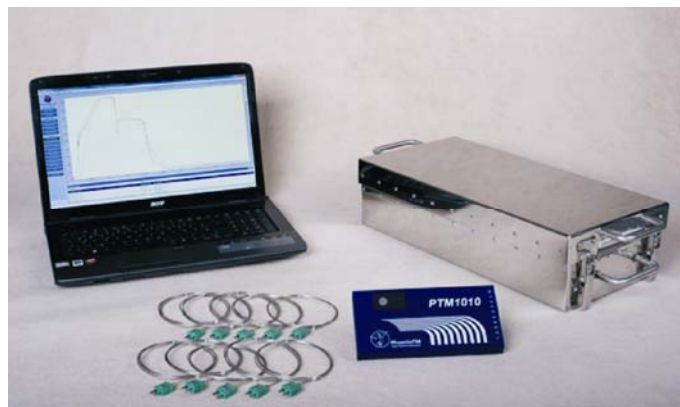


Рис. 1. Автономный регистратор температуры и теплозащитный контейнер компании Phoenix TM

Электроника регистратора рассчитана на длительную работу при температуре 110 °С. Перед использованием оператор программирует регистратор с помощью компьютера, задавая момент начала работы, число термопар и частоту опроса каналов. При этом имеется необходимая возможность изменить частоту опроса каналов в заданный момент времени или по достижении определенной температуры, если в процессе нагрева или термообработки происходит резкий нагрев или охлаждение (закалка) изделия. Таким образом обеспечивается возможность получения детальной картины быстропротекающего переходного процесса. Память регистратора рассчитана на 130000 измерений температуры. Питание регистратора автономное от высокотемпературных литиевых батарей.

В качестве датчиков температуры обычно используются гибкие кабельные термоэлектрические термометры типа К (ХА) или N (НН) в металлической оболочке из жаростойких сплавов Инконель или Никробель 1-го класса точности с погрешностью измерения температуры не более 0,4 %. Наружный диаметр кабельных термопар 3,0 мм. При использовании термопар на предельных температурах рекомендуется их однократное применение для исключения роста погрешности при повторной эксплуатации вследствие дрейфа термоЭДС. Для особых случаев (например, аттестации высокотемпературных печей) возможно также использование термопар из благородных металлов с погрешностью измерения температуры не выше 0,25 %.

Для точного измерения температуры изделия в процессе нагрева рабочие концы термопар заделываются внутрь стального сляба (на заданную глубину в его различных точках по его ширине и длине), а участки термопар от точек измерения до электронного регистратора, расположенного в защитном контейнере на изделии, дополнительно защищаются от прямого воздействия пламени горелок.

Для защиты регистратора от воздействия высоких температур в процессе эксплуатации перед проведением измерений он помещается в термозащитный контейнер, внутри которого рабочая температура регистратора не превышает 110 °С. Тепловая защита обеспечивается с помощью барьера-испарителя, заполненного водой, и наружного керамоволокнистого теплоизоляционного материала.

Система Phoenix TM оснащена приемно-передающим устройством и высокотемпературной антенной, что позволяет оператору на печи наблюдать за изменением температур металла и печи в процессе прохождения сляба через печь в режиме реального времени на экране компьютера. Это обеспечивает возможность при длительных процессах нагрева или термообработки оперативно воздействовать на процесс во время измерения температурного поля заготовки, движущейся через печь.

После выхода из печи термозащитный контейнер с регистратором данных переносится в зону охлаждения, наружная теплоизоляция сразу

снимается, а регистратор данных извлекается из контейнера. Экспериментальная заготовка затем медленно остывает, что дает возможность использовать ее неоднократно для исследования печей. Информация о нагреве изделия в каждой зоне печи до заданной температуры позволяет судить о соответствии процесса технологическим стандартам.

В комплекте с системой Phoenix TM поставляется программное обеспечение, при помощи которого возможно проводить анализ всех критических параметров процесса, графическое редактирование, архивацию, а также статистический анализ за выбранный период времени.

Исследование выполнялось поэтапно: сначала были проведены два нагрева экспериментальных слябов на печах № 1 и 2. Полученные данные свидетельствовали о том, что обе нагревательные печи стана 5000 являются сложным теплотехническим объектом, причем они отличаются друг от друга по тепловым и температурным режимам, это является в значительной мере следствием того, что в первом эксперименте работали обе печи, а во втором — только одна печь № 1.

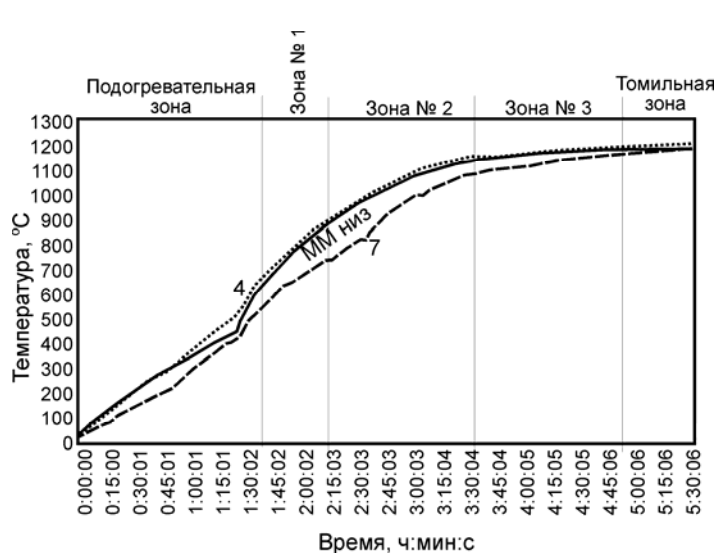
Затем было выполнено два нагрева экспериментальных слябов в печи № 2 с изменением задания температур в зонах регулирования. Причем в эксперименте № 3 задания изменялись в соответствующей зоне перед поступлением в нее экспериментального сляба, а в эксперименте № 4 все изменения заданий температур по зонам были внесены одновременно, сразу же после посадки сляба в печь. Сводные данные по всем экспериментам приведены в таблице

На основании результатов, полученных в ходе выполнения экспериментов, можно сделать следующие выводы:

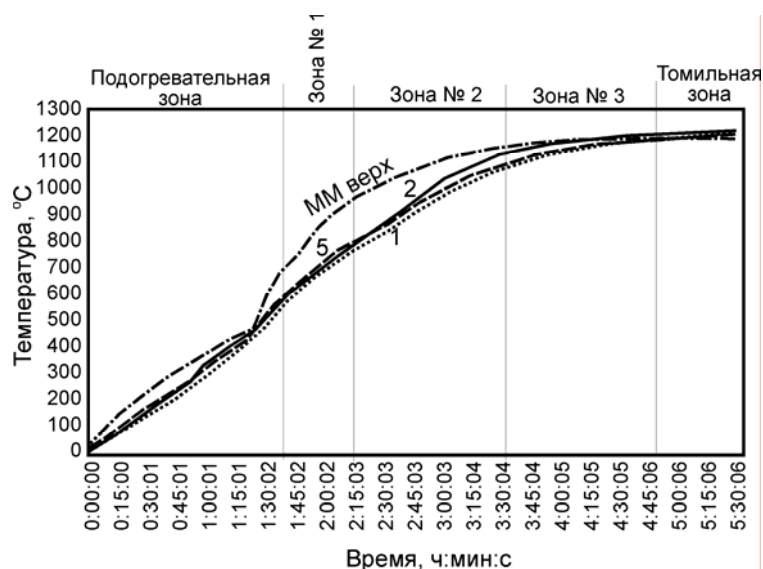
- печи с шагающими балками стана 5000 в целом решают поставленную задачу — обеспечивают нагрев толстых слябов перед прокатным станом;
- печи характеризуются достаточно низким удельным расходом топлива;
- математическая модель (ММ) не достаточно четко воспроизводит температуру металла по горизонтальным поверхностям сляба (рис. 2–4).

**СРАВНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ № 1 и 2**

Эксперимент/печь/ $T_{ц}$	Время нагрева, ч:мин	Перепад на выходе из зоны, °С					Температура, °С				
		по слябу	над балкой	по слоям			зоны (ЗД)		сляба		
				верх	середина	низ	верх	низ	средняя	max	min
<b>Подогревательная зона</b>											
1/2/1200±10	1:18	277,8	132,5	75,4	118,8	276,5	—	—	514,9	682,1	404,3
2/1/1200±10	1:38	316,1	124,9	61	107,6	227,9	—	—	654,4	826,1	510
3/2/1180±10	1:39	204,9	119	29,6	29,9	29,9	—	—	561,7	674,4	469,5
4/2/1180±10	1:42	163,3	58,2	105,1	33,2	86	—	—	481,5	571,4	408,1
<b>Зона № 1</b>											
1/2/1200±10	2:13	350,3	148,1	90	114,5	333,4	1180	1160	843,5	1058,7	708,4
2/1/1200±10	2:16	326,4	125	66,9	104,5	229	1210	1190	872,8	1059,3	732,9
3/2/1180±10	2:15	233,5	120,1	28,2	33,6	160,1	1180	1160	768,6	906,7	673,2
4/2/1180±10	2:35	217,6	68,5	149,1	36,9	143,9	1160	1140	749,7	870,1	652,5
<b>Зона № 2</b>											
1/2/1200±10	3:25	157,3	72,2	65,8	129,6	143,3	1230	1225–1220	1132,8	1219,5	1062
2/1/1200±10	3:00	190,1	89,7	70,5	124,4	114,1	1240	1240	1084,8	1174,5	984,4
3/2/1180±10	3:33	111	51,9	51,3	52,7	64	1220	1220	1099,1	1152,2	1044,2
4/2/1180±10	3:47	159,6	62,6	97	66,2	98,5	1210	1200	1003,9	1080,3	920,7
<b>Зона № 3</b>											
1/2/1200±10	5:00	37	12,6	16,9	35,1	32,7	1235–1225	1230–1220	1213,2	1232,2	1195
2/1/1200±10	4:00	51,9	25	25	42,4	34,7	1245	1245	1205,7	1230,4	1179
3/2/1180±10	4:50	36,7	21,7	17,6	18,1	24,7	1210	1210	1183,2	1201,7	1165
4/2/1180±10	5:11	58,6	22,7	35,9	26,4	33	1220	1210	1151,2	1182,3	1123,7
<b>Томильная зона</b>											
1/2/1200±10	5:44	40,4	5,9	10,2	20,3	36	1205	1200	1216,2	1230,5	1190
2/1/1200±10	4:45	26,3	10,9	15,5	23,7	18,3	1230	1230	1219,0	1231,1	1205
3/2/1180±10	5:28	23,8	12,9	10,9	13,4	19,5	1190	1190	1200,4	1211,1	1187,3
4/2/1180±10	5:54	41,6	18,8	22,8	14,9	19,8	1190	1180	1180,2	1202,8	1161,2



**Рис. 2.** Изменение температур по нижней поверхности сляба (эксперимент № 3)



**Рис. 3.** Изменение температур по верхней поверхности сляба (эксперимент № 3)

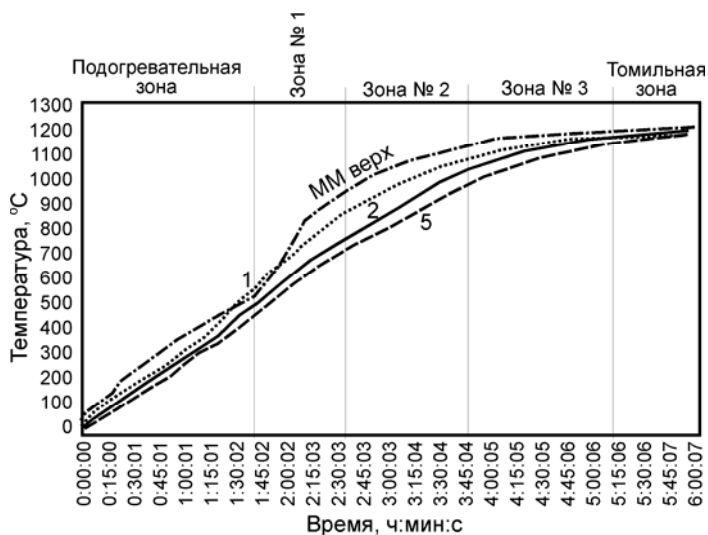


Рис. 4. Изменение температур по верхней поверхности сляба (эксперимент № 4)

Первоначально рекомендованный температурный режим работы печи (эксперимент № 3) при проверке показал улучшение нагрева металла (уменьшились перегрев и перепад по сравнению с экспериментами № 1 и 2), но все же имел место незначительный перегрев металла относительно целевой температуры. Поэтому в эксперименте № 4 было осуществлено более существенное снижение заданий температуры по зонам печи. При этом проявилось более сильное охлаждающее воздействие нижней конструкции печи на металл: температура в точке ТТ7 на протяжении всего процесса нагрева имела большие провалы по сравнению с экспериментом № 3, которые привели, хотя и к незначительному, но все же недогреву данной точки.

В результате анализа данных проведенных экспериментов совместно с цехом и ЦЭСТ раз-

работан новый режим нагрева металла в печах стана 5000. Сравнительный график изменения абсолютного перепада температуры по слябу для экспериментов № 1, 3 и 4 представлен на рис. 5.

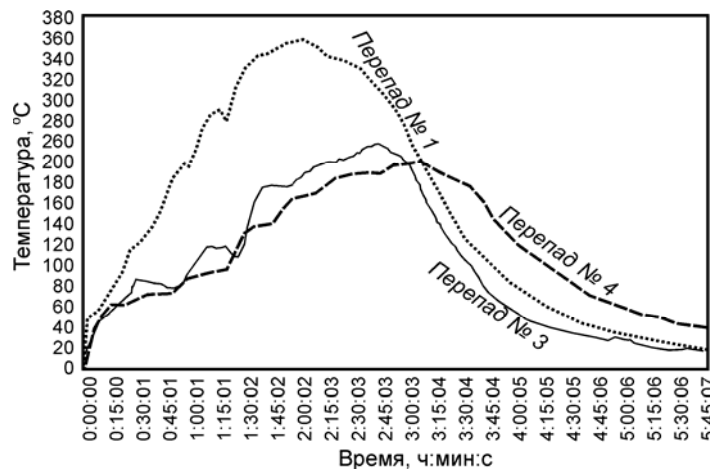


Рис. 5. Изменение абсолютного перепада температуры по слябу (эксперименты № 1, 3 и 4)

При внедрении нового режима нагрева экономия топлива составила от 1,5 до 2 м<sup>3</sup>/т металла (0,8–1,1 кг у.т/т).

Результаты данной работы подтверждают важную роль экспериментального исследования тепловой работы печи — сложного теплотехнического агрегата. Каждая печь — это уникальное сооружение, требующее индивидуального подхода. Особенности конкретного агрегата всегда известны персоналу цеха предприятия и только в результате сотрудничества и совместной слаженной работы удастся добиться поставленных изначально целей.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

- Беленький А. М., Дубинский М. Ю., Чибизова С. И. Промышленный эксперимент — основа проведения энергосберегающей политики в металлургической теплотехнике // Металлург. 2010. № 5. С. 26–29.
- Беленький А. М., Бурсин А. Н., Улановский А. А. Совершенствование тепловой работы нагревательных печей станов горячей прокатки // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. 2015. № 2. С. 62–69.
- Беленький А. М., Бурсин А. Н., Чибизова С. И. Контроль температуры в металлургии // Приборы. 2010. № 12. С. 2–11.
- Plester D., Taake M. Ten practical tips for ensuring accurate data from reheat profiling. Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология / Труды VI Междунар. научно-практич. конф. — М.: МИСиС. 2012. С. 384–391.
- Теплотехническое обследование нагревательных печей и повышение их тепловой эффективности с помощью системы мониторинга температурного поля / С. Н. Филиппов, И. Г. Асатурян, О. В. Глазунов и др. Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. Труды VI Междунар. научно-практич. конф. — М.: МИСиС. 2012. С. 494–500.
- Улановский А. А., Беленький А. М. Повышение эффективности нагревательных печей станов горячей прокатки. Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология / Труды VI Междунар. научно-практич. конф. — М.: МИСиС. 2012. С. 472–484.
- Температура: теория, практика, эксперимент. Т. 2. Измерение температуры в промышленности и энергетике / А. М. Беленький, М. Ю. Дубинский, М. Г. Ладыгичев и др. — М.: Теплотехник. 2007. — 736 с.
- Совершенствование тепловой работы печей стана 2000 ОАО ММК / А. М. Беленький, Е. А. Болтенкова, М. Ю. Дубинский, В. Н. Партин. Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К 100-летию со дня рождения М. А. Глинкова. Труды III Междунар. научно-практич. конф. — М.: МИСиС. 2006. С. 152–156.
- Исследование тепловой работы нагревательных печей стана 5000 / Н. Б. Скорохватов, С. В. Сосин, О. А. Коженикова и др. Печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии и машиностроении. Труды IV Междунар. научно-практич. конф. — М.: МИСиС. 2008. С. 328–333.