

РЕГУЛЯРНАЯ ДИАГНОСТИКА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С. И. Чибизова¹, А. М. Беленький²,
А. А. Улановский³, А. Н. Бурсин⁴, Р. Р. Галиева¹

¹ НИТУ «МИСИС» (г. Москва, Россия),

² Северокавказский горно-металлургический институт (ГТУ) (г. Владикавказ, Россия),

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

⁴ ООО РМЦ «Калиброн» (г. Москва, Россия)

Предложена методика проведения регулярной диагностики печного агрегата станов горячей прокатки, как необходимая мера обеспечения эффективного функционирования основного оборудования производства высококачественного проката. Оперативная диагностика позволит дойти до самой сути проблем печи, обеспечит постоянную эффективную работу и минимизирует затраты топлива, электроэнергии, экологически вредные выбросы и, главное, максимизирует прибыль предприятия.

Ключевые слова: стан, горячая прокатка, печной агрегат, нагрев, диагностика.

В 2024 г. страна отмечала две значимые для нас даты: 300 лет создания Академии наук России и 130 лет со дня рождения Д.И. Менделеева, много сделавших для науки и инженерного искусства в нашей стране. Д.И. Менделеев особенно подчеркивал важность измерения и обеспечения его точности.

Развитие человеческой цивилизации — это непрерывное овладение знаниями. Metallургия является первым промышленным воплощением прогресса человечества: начиная со случайных плавлений бронзы в кострах и перехода затем к специальной плавке меди, ее сплавов и золота для жизненно важных задач. Бронзовый и медный века повысили уровень жизни людей. Резкое усиление могущества человека ознаменовалось овладением производством сплавов железа — чугуна и стали. Были созданы различные печи для плавки, нагрева перед ковкой и закалкой, а также для проведения специальной тепловой обработки. Появились новые более узкие технические специальности — не просто металлурги, а плавильщики (доменщики, сталевары), кузнецы, прокатчики, печники. Последние, в свою очередь, стали подразделяться на создателей данных агрегатов, их строителей и эксплуатационников. Печные агрегаты (ПА) усложнялись, увеличивались их размеры и производительность, что обеспечило выпуск материалов с новыми свойствами. Профессия печник стала востребованной и уважаемой. Следует отметить, что в нашей стране была создана для населения «русская печь», которая существенно повысила качество жизни, особенно крестьян. Отсюда и пословица: «Не красна изба углами, а красна — пирогами».

Освоение изобретенных в середине XIX века бессемеровского конвертера и мартеновской печи обеспечило взрывной характер развития черной металлургии и всего мирового промышленного производства. В настоящее время годовой объем выплавки стали в мире приблизился к 2 млрд т, причем мартены практически сошли со сцены и весь объем обеспечивается конвер-

терами и электродуговыми печами. Продолжают создаваться новые технологии, позволяющие получать сталь, минуя стадию чугуна [1]. На металлургических предприятиях функционирует громадное количество нагревательных печей (НП) для обеспечения нагретыми заготовками станов горячей прокатки. Растет единичная производительность НП, повышаются требования к качеству металла, ужесточаются нормативы по удельным затратам энергии и величине вредных выбросов. Для сокращения эксплуатационных затрат и повышения надежности функционирования ПА оснащаются большим количеством средств измерения (СИ), являющихся частью АСУТП, включая сложную компьютерную технику. Однако, несмотря на развитие ПА и значительное внимание к ним, имеются резервы дальнейшего совершенствования конструкции, а также своевременного обнаружения неполадок и отклонений в работе, что требует проведения периодической оперативной диагностики.

Металлургическая печь для нагрева и термообработки — это сложная система, состоящая из большого числа связанных между собой подсистем меньшей сложности (система транспортировки, системы сжигания топлива, узлы регулирования температуры, расхода, давления и другие), определяющих особенности функционирования всего агрегата. Изучение его отдельных подсистем необходимо, но не даёт полного и адекватного представления о работе всей системы более высокого порядка. Это приводит к необходимости, после изучения отдельных составляющих, исследовать функционирование технологического агрегата как единой системы.

Металлургические печи должны проходить не только текущие и капитальные (плановые или аварийные) ремонты, но и подвергаться регламентированному обслуживанию, как любые сложные агрегаты. Оперативная диагностика как профилактическое мероприятие (например, техническое обслуживание ТО1 или ТО2) позволит вовремя выявить отклонения в работе печи



Рис. 1. Автономный регистратор температуры компании «Phoenix TM» и теплозащитный контейнер: а – составляющие системы; б – АРТ в сборе перед распаковкой системы

и устранить или предупредить их, т. е. постоянно поддерживать высокую работоспособность агрегата.

Опыт проведения теплотехнологических исследований проходных нагревательных печей комбинатов ММК, НЛМК, «Северстали», «Уральской стали», Выксунского, Чусовского и других заводов [2] показал, что все ПА нуждаются в проведении регулярной диагностики для совершенствования их работы и поддержания эффективного функционирования. Для проведения исследований применяются достаточно дорогие и сложные, а в ряде случаев уникальные приборы (автономный регистратор температуры (АРТ) с радиомодемом, тепловизоры, высокоточные пирометры излучения, газоанализаторы, хроматографы и др.). Необходимо создать и внедрить в процесс эксплуатации печей, учитывая сложные условия их работы (высокие, часто предельные температуры, взрывоопасность, скорость протекания процессов, размеры

агрегата, изменение условий работы, снижения стойкости элементов конструкции), методологию оперативной диагностики печного агрегата. Она должна обязательно включать специально назначаемые межсервисные интервалы с проведением специальных профилактических обследований, с четко указанным объемом работ, которые планово выполняются в период эксплуатации раз в полгода-год, включая направленный теплотехнологический эксперимент, с обязательным определением изменения реального температурного поля нагреваемого массивного сляба.

На металлургических заводах и особенно на комбинатах имеется большое количество печей и других тепловых агрегатов: коксовые батареи, котлы, турбины, котлы-утилизаторы и др. Следовательно, объем тепловой диагностики весьма велик. Поэтому необходимо создать специализированную группу или лабораторию внутри отдела главного энергетика, которая будет практически постоянно загружена специфической, весьма важной и необходимой работой, что обеспечит значительный экономический эффект, так как будет проводиться высококвалифицированным персоналом в плановом режиме с использованием высокоточного специального оборудования, которым невозможно оснастить каждый агрегат.

Проходные печи для нагрева слябов перед станами горячей прокатки должны обеспечить достижение заготовкой заданной температуры с минимальным перепадом по массе, без перегрева и с необходимой выдержкой для выравнивания температуры и прохождения заданных структурных превращений. Процесс нагрева фактически ведется без измерения реальной температуры металла в течение всего времени его пребывания в рабочем пространстве ПА. На станах конечный результат работы печи оценивается только по усилию обжатия в черновых клетях и по уровню, а также равномерности температуры раската перед группой чистовых клетей [3 – 5].

Оперативная диагностика ПА включает следующие этапы.

1. Ознакомление с агрегатом, которое охватывает: а) уяснение и уточнение технического задания; б) изучение документации: рабочих чертежей агрегата, сортамента нагреваемого металла, ТИ процесса нагрева и прокатки; в) беседу с оперативным персоналом: работниками стана, печного участка, ОТК; г) формулировку основных направлений, объема и последовательности диагностики работающего ПА.

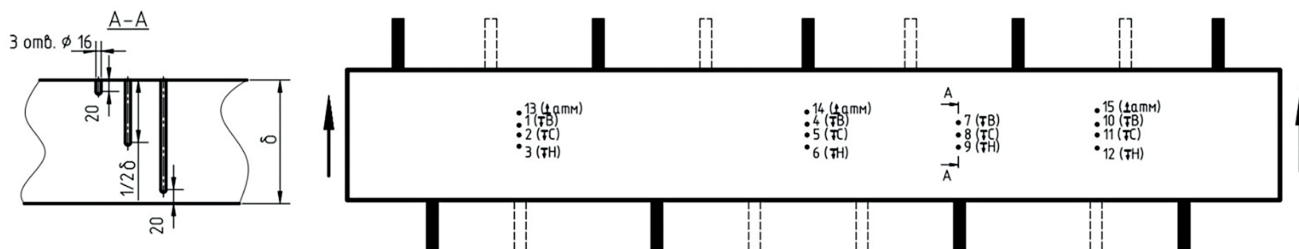


Рис. 2. Схема установки термоэлектрических термометров в слябе

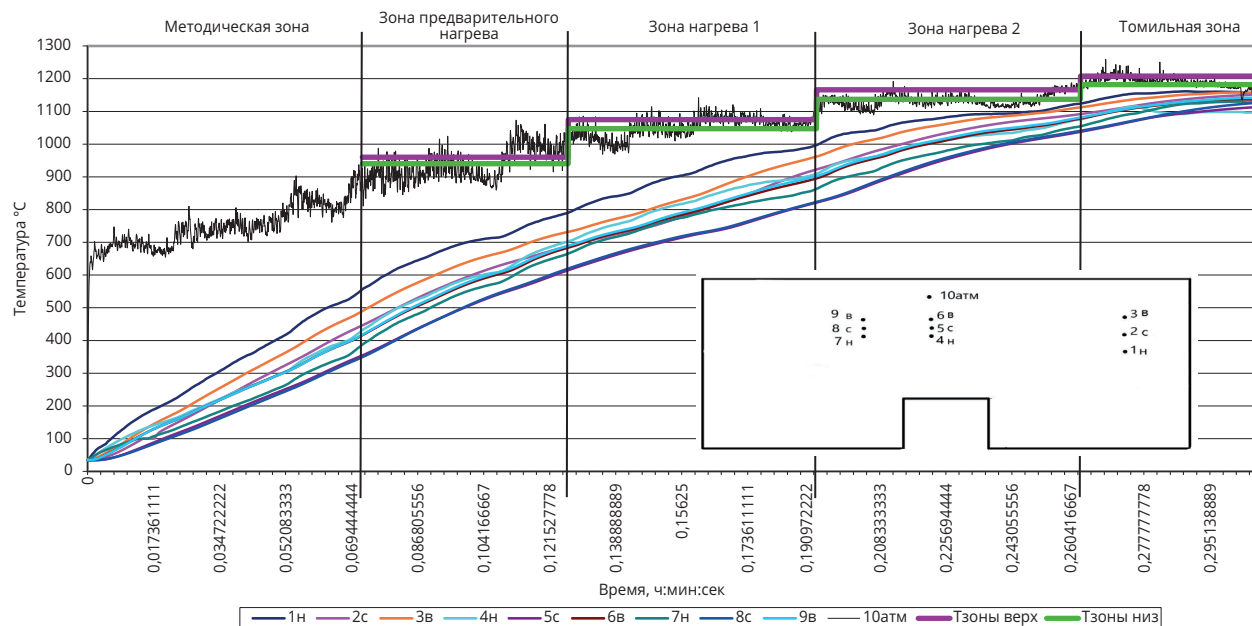


Рис. 3. Сводный график нагрева сляба в проходной НП [2]

2. Составление технологической карты выполнения ДПА. Определение основных точек контроля тепловых и технологических процессов; необходимого числа непрерывной и дискретной фиксации параметров процесса с указанием точностных, динамических, статических и временных показателей. Утверждение порядка проведения ДПА в цехе.

3. Подготовка дополнительного специального оборудования и экспериментального сляба (заготовки). В слябе выполняются отверстия в определенных точках по длине, ширине и глубине для установки в них рабочих спаев гибких термоэлектрических термометров, подключаемых к АРТ (рис. 1), для получения необходимой картины изменения температурного поля массивного металла. Несколько ТТ устанавливаются над слябом для фиксации изменения температуры продуктов сгорания в процессе нагрева. Необходимо, чтобы хотя бы два вертикальных сечения располагались в тех частях сляба, где его нижняя поверхность не попадает на неподвижные балки, и чтобы эти сечения по возможности были в противоположных частях сляба, что позволит оценить однородность нагрева по ширине печи. Два сечения лучше расположить таким образом, чтобы одно попадало на неподвижную балку в начале печи, а второе — на неподвижную балку во второй части по длине печи. Термопары для измерения температуры продуктов сгорания над слябом лучше устанавливать в трех точках (слева, справа и посередине над слябом), чтобы составить представление о распределении и изменении температурного поля непосредственно над слябом по ширине печи (рис. 2).

До начала ДПА необходимо также определить фиксируемые параметры процесса в ходе нагрева на основании показаний штатных приборов. В современных печах можно извлечь эти данные из АСУТП, но если такой возможности нет, то следует фиксировать зна-

чения параметров вручную в процессе эксперимента с периодичностью 15-30 мин. В общем случае это могут быть заданные и фактические показания зональных термопар, расходы топлива и воздуха по зонам печи, давление в печи, содержание кислорода в продуктах сгорания и их температура до и после рекуператора.

4. Проведение направленного исследования реальной работы ПА при обычном (или специально измененном) процессе нагрева. Регистрируются все необходимые параметры, АРТ передает в режиме реального времени измеренные сигналы термоэлектрических преобразователей с помощью радиомодема на экран компьютера АРТ операторов в помещении теплового щита ПА, всю картину изменения температуры в точках сляба, где установлены термоэлектрические термометры. После выдачи экспериментального сляба из печи осуществляется распаковка защитного контейнера и извлечение регистратора. Затем электронное устройство с записанными данными о температурных измерениях можно подключить к ПК и перенести все данные в его память. Эти данные в совокупности с фиксируемыми в процессе нагрева показаниями штатных приборов служат документом о температурном режиме нагрева сляба (рис. 3).

5. Сохраненные данные выполненных нагревов в НП обрабатываются в программе для работы с электронными таблицами и в виде графиков, диаграмм и таблиц предоставляются персоналу цеха как промежуточный отчет.

6. Специалисты, выполняющие ДПА, обрабатывают и анализируют полученные данные, формируют отчет с выводами о работе печи, о достоинствах и недостатках, свои выводы о мероприятиях по совершенствованию процесса нагрева или в целом работы ПА.

7. Представление полученных данных ДПА и защита выводов с разработанными способами улучшения работы печи на техническом совете цеха.

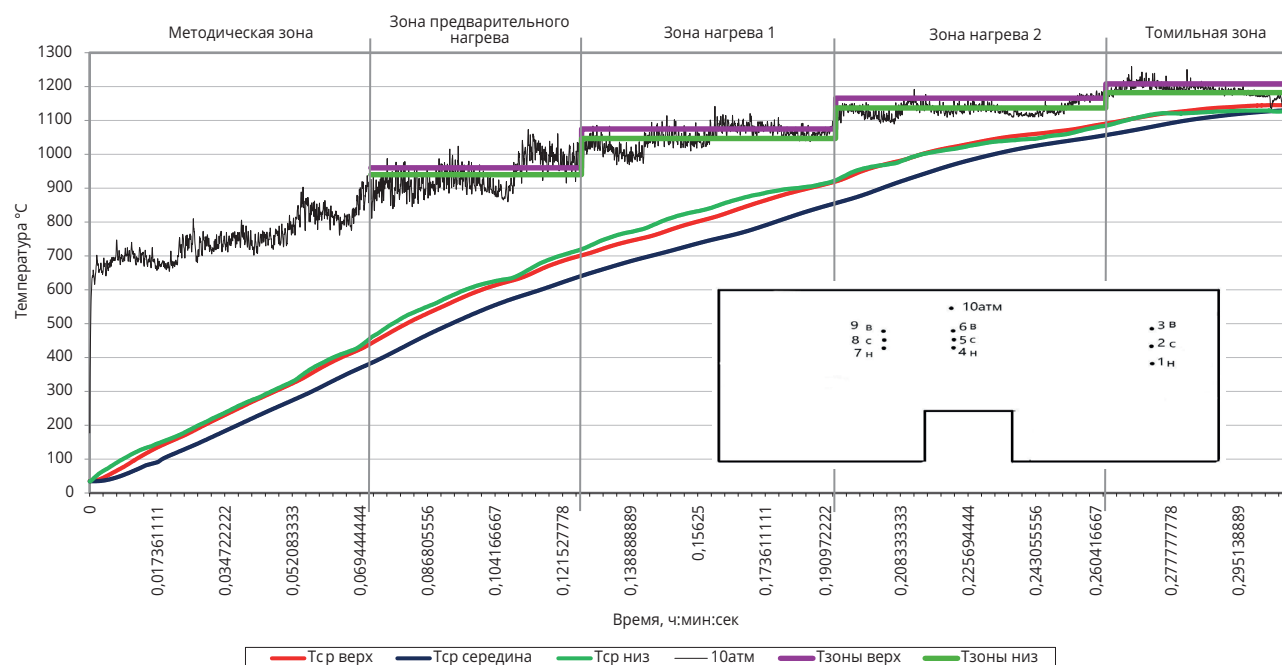


Рис. 4. Изменение средней температуры верхней и нижней поверхностей и середины слэба

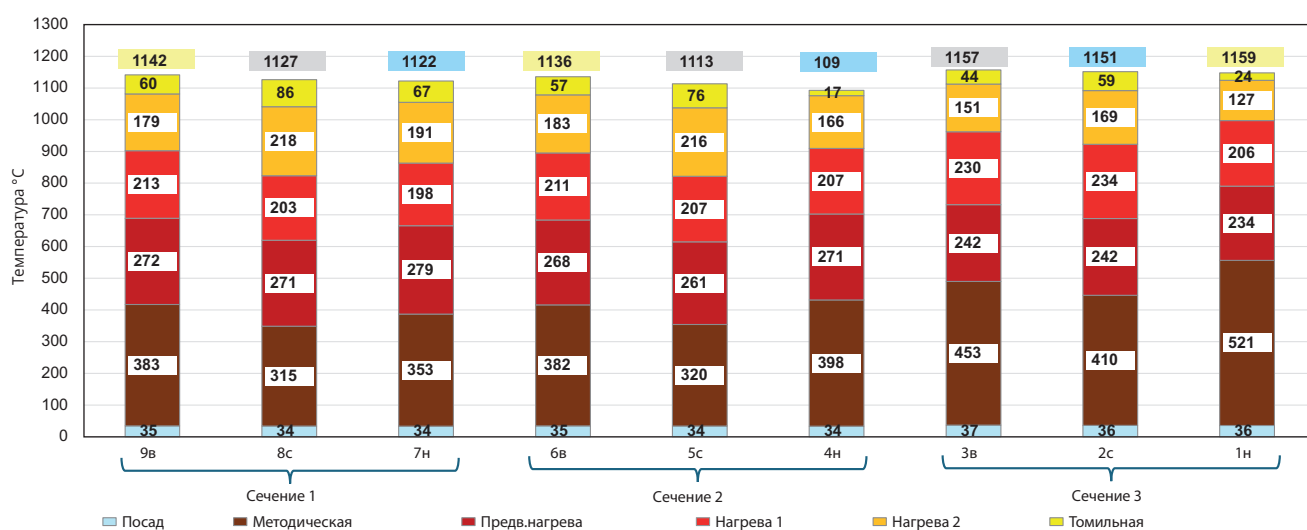


Рис. 5. Прирост температуры в измеряемых точках слэба по зонам печи

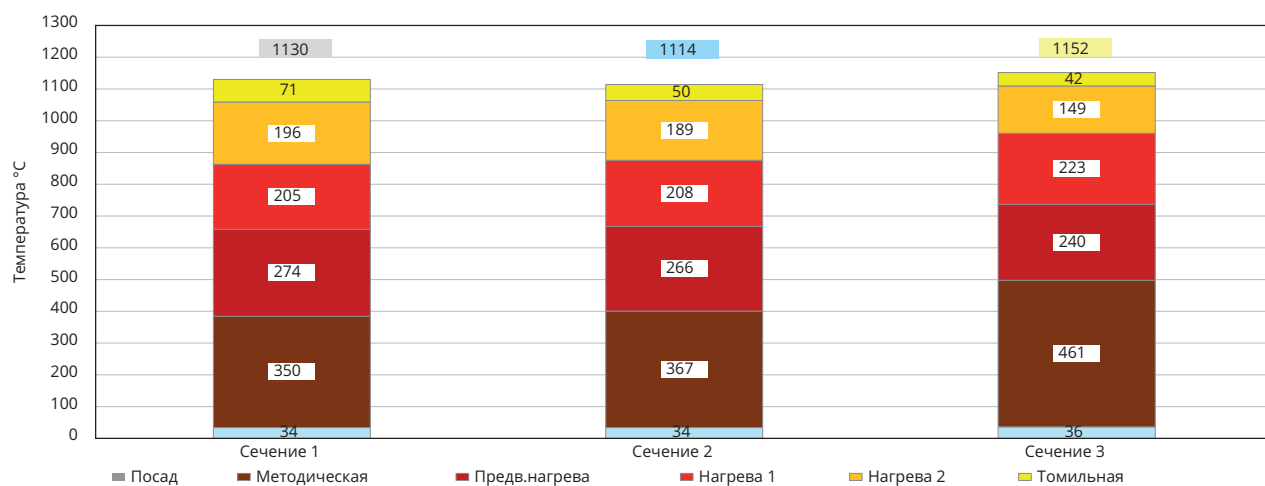


Рис. 6. Прирост средней температуры вертикальных сечений по зонам печи

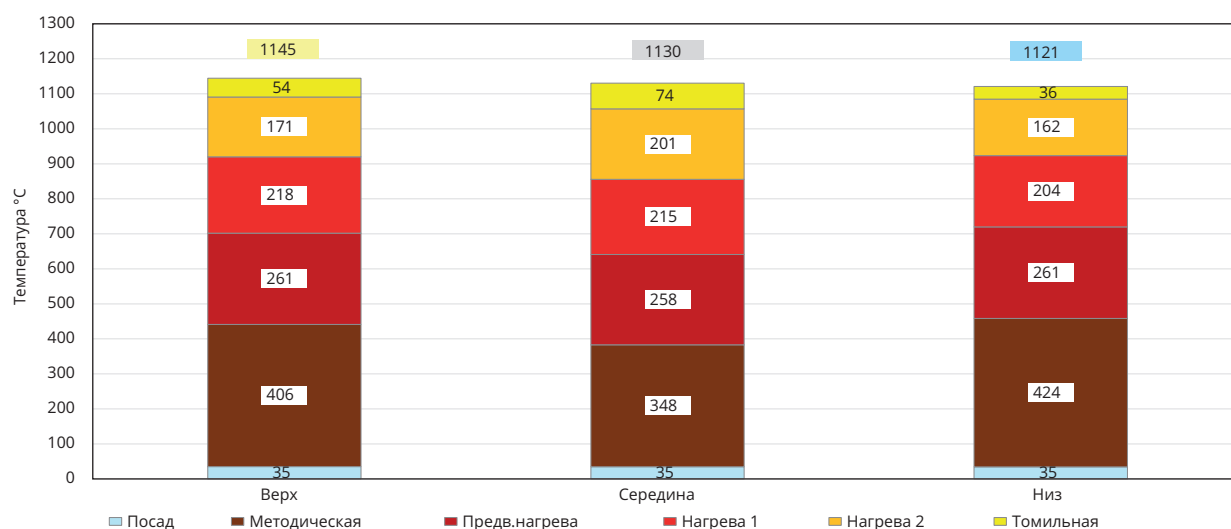


Рис. 7. Прирост средней температуры поверхностей (верхней и нижней) и середины сляба по зонам печи

По мере накопления результатов экспериментов нагрева слябов формируется база данных, которая может быть использована, например, для создания статистической модели работы агрегата.

Шестой этап оперативной диагностики ДПА является наиболее показательным, так как необходимо весь полученный массив данных обработать таким образом, чтобы наглядно представить особенности нагрева металла и работы печи, выявить направления совершенствования. Сводный график нагрева металла (см. рис. 3) демонстрирует общую картину нагрева. В первую очередь оцениваются задачи нагрева — достижение необходимого уровня температуры металла и допустимого перепада температуры по толщине сляба на выдаче из печи. Полученные данные позволяют также определить уровень и однородность температуры продуктов сгорания по ширине печи (при условии установки нескольких термопар для измерения температуры продуктов сгорания над слябом) и нагрева металла по длине сляба. Изменение во времени средних значений температуры поверхностей и середины металла дает понимание о нагреве сляба в целом (рис. 4).

Графики на рис. 3 и 4, безусловно, информативны и обеспечивают понимание изменения теплового состояния сляба, но для оценки однородности температурного поля металла и вклада каждой из зон печи предлагается новое представление информации, получаемой с помощью АРТ.

Важно также достаточно быстро и исчерпывающе узнавать количественные параметры изменения теплового состояния сляба. Поэтому в методике ДПА разработаны графические способы представления количественной информации о процессе нагрева заготовки в печи.

На рис. 5 — 7 приведены варианты представления результатов нагрева сляба (на основании данных рис. 2), позволяющие наглядно оценить работу зон печного агрегата и неоднородность по толщине и длине сляба.

На рис. 8 приведены изменения среднего прироста для холодного посада слябов толщиной 312 мм. Значения относительного изменения прироста средней температуры верхней, нижней поверхностей и середины сляба рассчитывались с шагом в половину длины зоны. Из графика можно сделать вывод о вкладе каждой зоны, что в свою очередь позволит управлять нагревом (т. е. подачей топлива через горелки) в зоне. Представлен новый способ обработки результатов диагностики НП стана горячей прокатки, который, по нашему мнению, более глубоко и более исчерпывающе раскрывает возможности использования полученной информации при диагностике работы НП.

На рис. 8 видно, что наибольший прирост температуры происходит во второй половине методической зоны, с середины второй нагревательной зоны наблюдается наибольший прирост температуры середины сляба по сравнению с поверхностями. То есть такой способ представления данных позволяет проследить прирост температуры по длине печи.

Сложность процесса нагрева потребовала разработки и применения нового подхода в методике ДПА, который позволяет оценить тепловую работу агрегата — изменение параметров внешнего теплообмена на процесс нагрева металла. На рис. 9 и 10 приведено изменение относительных приростов температуры на верхней и нижней поверхностях сляба, что позволяет наглядно представить однородность температурного поля над слябом по длине и ширине проходной печи. Представление нагрева сляба с этой точки зрения делает предлагаемую диагностику новым шагом в познании работы ПА.

Нагрев по длине печи (рис. 9) достаточно неоднородный: интенсивный в методической зоне (1/2 м и м) с наибольшей интенсивностью с правой стороны сляба по ширине печи, снижается в первой половине зоны предварительного нагрева (1/2 зпн) и появляется большая однородность нагрева по ширине печи, затем возрастает ко второй половине нагревательной зоны 1 (н1), но появляется неоднородность по ширине печи.

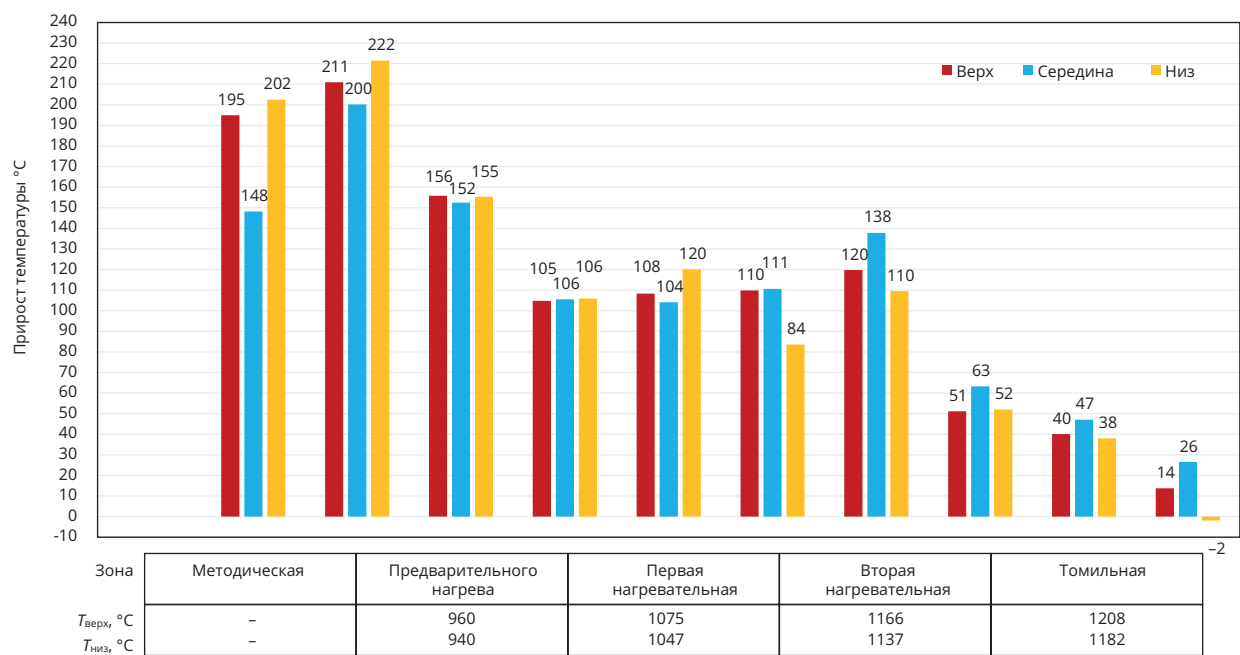


Рис. 8. Изменение среднего прироста температуры по поверхностям и середине сляба за половину длины зоны (толщина сляба 312 мм, на основании данных рис. 2)

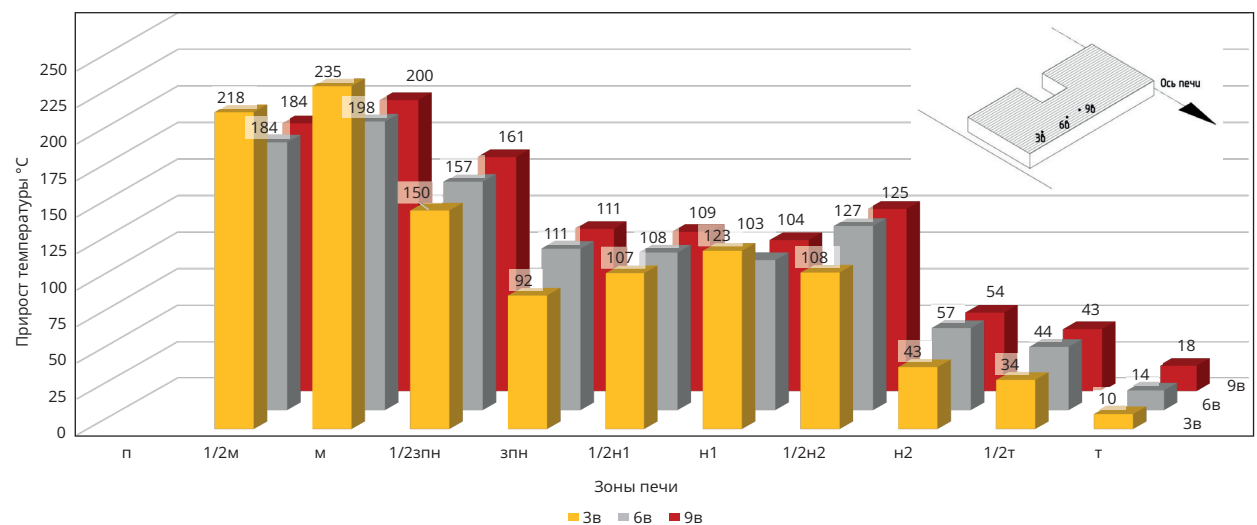


Рис. 9. Изменение относительного прироста температуры верхней поверхности по ширине сляба за половину зоны

Прирост температуры в первой половине второй нагревательной зоны (н 2) оказывается существенно неоднородным по ширине печи за счет высокой интенсивности нагрева левой стороны и середины сляба по ширине.

Рис. 10 демонстрирует различное охлаждающее влияние транспортной системы, работы горелок и аэродинамики продуктов сгорания по ширине печи. Этот тип представления характера нагрева сляба в НП повышает информативность проведённой диагностики печи, позволяет сравнивать результаты нагрева слябов и работу печей. Особенно это важно для печей, в которых нагреваются слябы длиной 10-12 м и толщиной 315 мм и более.

На основании опыта исследования и совершенствования металлургических печей создана и опро-

бована методика диагностики нагревательных печей станов горячей прокатки, позволяющая достаточно исчерпывающе определить фактические результаты нагрева массивной заготовки с определением изменения температурных полей в процессе нагрева по длине и толщине сляба, а также показать особенности тепловой работы ПА в каждой зоне по ее длине и ширине как системы верхнего, так и нижнего отопления.

Предложено внедрить в производственную практику регулярное проведение оперативной диагностики состояния данного оборудования. Это позволит прийти до сути проблемы нагрева массивного металла в печи и обеспечит достижение следующих результатов:

1) высококачественное и эффективное функционирование сложного оборудования;

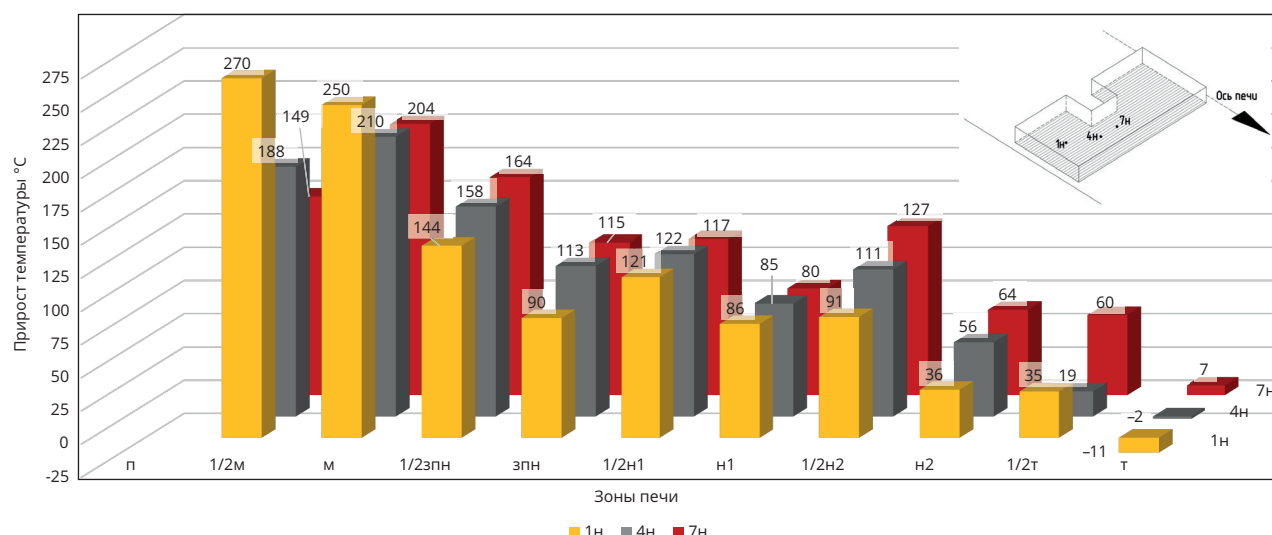


Рис. 10. Изменение относительного прироста температуры нижней поверхности по ширине сляба за половину зоны

2) возможность проведения своевременного исправления появляющихся отклонений в работе отдельных элементов и узлов печи, средств контроля и управления;

3) быстро и уверенно переходить на новые режимы работы печи: производство новых марок металла, отработка температурных и тепловых режимов, а также внедрение новых современных методов и средств нагрева, устройств контроля и управления ПА;

4) существенное улучшение работы сложных теплотехнических систем, снижение удельного расхода топлива, воды, электроэнергии, увеличение межремонтного периода, снижение экологически вредных выбросов, повышение культуры производства.

Многолетний опыт исследования в режиме реального функционирования ПА в металлургии показал, что диагностика, выполняемая на базе промышленного направленного теплотехнологического эксперимента с использованием специального комплекта оборудования, обеспечивает достижение весомых результатов: исключается перегрев металла, сокращается количество брака, существенно снижается расход топлива, улучшается экологическая обстановка. Полученные данные об изменении температуры массивного металла используются для настройки существующих и создания новых ММ нагрева и управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Strogonov K.V., Lvov D.D., Murashov V.A. et al. Reduction of iron-containing materials by carbon-hydrogen mixture in a liquid-phase reactor // International Journal of Hydrogen Energy. 17 April 2025. Vol. 120. P. 346 – 353.
2. Улановский А.А., Тааке 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.
3. Чибизова С.И., Бельский А.М., Улановский А.А., Хадзарагова Е.А. Измерение температуры в нагревательных печах // Труды XIV Конгресса прокатчиков (Т. 1): Сборник статей / Коллектив авторов. Редакционная комиссия: Спирин С.А. (председатель), Думчева Т.Н. – М.: ООО «Грин Принт», 2024. С. 57 – 68.
4. Лещинский А.И., Кадошников А.А., Улановский А.А. Использование системы мониторинга температуры DataPaq для приемки в промышленную эксплуатацию нагревательной печи прокатного стана / Труды VI Междунар. науч.-практ. конф. «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», посвященной 80-летию ММК. Москва, МИСиС, 15 – 20 ноября 2012. ООП «ИТЕП», НИТУ «МИСиС». – М.: 2012. С. 330 – 335.
5. Чибизова С.И., Бельский А.М. Нагрев и термообработка массивного металла в металлургии. Сообщение 1. Проходные печи станов горячей прокатки // Сталь. 2024. № 6. С. 16 – 22.

Статья поступила 18.09.2025