

обжиговых машин фабрики окомкования характеристики типоразмеры новых дымососов. Их установка на предприятии позволила снизить удельный расход электроэнергии до 25,7 кВт ч/т обожженных окатышей, а также абсолютный расход электроэнергии на 50 % на каждой из ТДУ.

Список использованных источников

1. Берман Ю.А. Основные закономерности производства окатышей. – Челябинск: Металлургия, 1991. – 184 с.
2. Боковиков Б.А., Брагин В.В., Евстюгин С.Н. [и др.]. Теплофизические закономерности термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине. – Екатеринбург: УИПЦ, 2013. – 200 с.
3. Велецкий Р.К., Григина Н.Н. Измерение параметров пылегазовых потоков в черной металлургии». – М.: Металлургия, 1979. – 79 с.
4. Брук А.Д. Тягодутьевые установки в металлургии. – М.: Металлургия, 1965. – 180 с.
5. Теплофизические основы тепловой работы металлургических слоевых печей и агрегатов: учебное пособие / Ю.Г. Ярошенко, В.С. Швыдкий, Н.А. Спирин, В.И. Матюхин, В.В. Лавров; под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: АМК «День РА», 2019. – 464 с.

УДК 621.783.231

А. М. Беленький¹, М. Ж. Богатова², С. И. Чибизова²

¹ ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», г. Владикавказ, Россия

² НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия

К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ

Аннотация. В статье рассмотрен метод совершенствования тепловой работы нагревательных печей с шагающими балками станов горячей прокатки на базе статистического моделирования. Используя результаты, полученные в ходе проведения автоматизированных направленных теплотехнологических промышленных экспериментов на проходных нагревательных печах широкополосных листовых станов горячей прокатки российских металлургических предприятий, разработана статистическая модель, связывающая температуру верха, середины и низа сляба в конце каждой зоны печи с параметрами агрегата и значениями штатных средств измерения в процессе нагрева. Показаны достоинства и недостатки аналитических и статистических математических моделей. Приведено сравнение экспериментальных данных со значениями, рассчитанными по статистической и аналитической моделям для печи стана 5000. Сформулированы основные выводы, базирующиеся на результатах проделанного исследования.

Ключевые слова: нагрев металла, математическая модель, статистическая модель, аналитическая модель, промышленный эксперимент, печь с шагающими балками.

Abstract. *The article considers a method for improving the thermal operation of walking beam heating furnaces of hot rolling mills based on statistical modeling. Using the results obtained in the course of conducting automated directed heat-technological industrial experiments on continuous heating furnaces of wide-strip sheet hot rolling mills of Russian metallurgical enterprises, a statistical model has been developed that relates the temperature of the top, middle and bottom of the slab at the end of each furnace zone with the parameters of the unit and the values of standard measuring instruments during the heating process. The advantages and disadvantages of analytical and statistical mathematical models are shown. The experimental data are compared with the values calculated by statistical and analytical models for the furnace of the mill 5000. The main conclusions based on the results of the study are formulated.*

Key words: *metal heating, mathematical model, statistical model, analytical model, industrial experiment, walking beam furnace.*

Нагрев металла перед прокаткой – сложный процесс, в котором задействован целый комплекс технологического и энергетического оборудования [1]. Одним из основных параметров нагрева в печах является температура металла. Температура – интегральная величина, определяющая достижение необходимого качества, заданной производительности, минимизации затрат электроэнергии, топлива, воды. Работа проходных нагревательных печей организована таким образом, что контроль температуры металла осуществляется на рольганге перед посадом в печь, а затем только за пятой клетью стана. В печи температура металла не контролируется, а процесс ведётся в соответствии с режимом нагрева по показаниям зональных термоэлектрических термометров (ЗТТ).

Математические модели (ММ) – важный инструмент познания реального мира и он, представляют собой один из лучших методов исследования технологического объекта. Адекватная математическая модель позволяет осуществлять многовариантные вычислительные эксперименты и оптимизировать сложные многофакторные системы.

Результаты исследований режимов нагрева металла, выполненных на печах станов горячей прокатки РФ с годовым производством более 30 млн. т листа [2], свидетельствуют – показания ЗТТ значительно отличаются от реальной температуры металла (за исключением томильной зоны), а также от этих значений, рассчитанных с помощью ММ, что приводит к его перегреву (или недогреву), интенсивному окалинообразованию и снижению стойкости печи. Аналитические математические модели (АММ) нагрева, на основании которых ведётся управление печью, нуждаются в периодической корректировке ввиду изменения значений настроечных коэффициентов, в том числе из-за старения агрегата.

Аналитические модели представляют собой выражения конечных параметров как функций начального и переменного состояний печи и заготовок, используют фиксированные (табличные значения) теплофизических свойств, а также включают ряд существенных ограничений при задании условий однозначности [3-11]. Среди преимуществ АММ можно выделить простоту вычислительных операций при высокой скорости расчёта. К недостаткам АММ нагрева, на основании которых ведётся управление печью, можно отнести ограниченное число факторов, наличие допущений и, следовательно, необхо-

димось периодической корректировки аналитической модели ввиду изменения параметров агрегата.

Повышение эффективности процесса нагрева в металлургических печах требует разработки таких ММ, которые максимально учитывают разнообразные взаимосвязи между теплофизическими процессами в рабочем пространстве печи и влияние отдельных факторов на динамику тепловых и температурных процессов [12].

Сказанное выше является важнейшим стимулом для исследования и разработки новых и модернизации ранее известных методов контроля температуры металла в различных нагревательных печах. Принимая во внимание масштабы производства проката, даже небольшое снижение расхода топлива и угара металла, определяемых точностью контроля температуры металла, приводит к существенному экономическому эффекту и улучшению тепловой работы и эксплуатационных показателей нагревательных печей [1].

На рисунке 1 представлено сравнение изменения реального перепада температур в слябе, полученного экспериментально, с перепадом, рассчитанным по АММ. Существенные различия характерны для первых зон печи. Значения максимального перепада температур в реальном процессе достигается уже к концу методической зоны и сохраняется до конца сварочной зоны. По данным АМ максимальный перепад фиксируется в сварочной зоне и сохраняется не продолжительное время. Также можно выделить различные значения перепада на выдаче металла из печи (разность составляет около 50 °С). Следует обратить внимание и на такую особенность АММ, описывающую изменение перепада температур в массивном металле, практически невозможны такие резкие и глубокие изменения температуры (см. интервал времени с 2.10 до 4.45, а также с 5.05 до 6.32 на рисунке 1).

В АММ используется большой объём информации: а) наблюдаемые модельные переменные (непосредственно измеряемые на агрегате, измеренные в лаборатории, рассчитываемые по формулам), например, температура в зоне, температура подогрева воздуха, конструктивные параметры печи и т.д.; б) ненаблюдаемые модельные переменные (принципиально ненаблюдаемые, технически ненаблюдаемые, в т.ч. из-за отсутствия средств измерения (СИ)), например, степень черноты, коэффициент теплоотдачи на поверхности заготовки, кладки и т.д.

Для наиболее точного расчёта изменения температурного состояния сляба при движении через печь в АММ также необходимо учитывать зависимость всех теплофизических характеристик металла от температуры и теплофизических процессов, протекающих при нагреве в методической печи [14].

Независимо от того, какой метод математического моделирования использовать, для адаптации ММ необходимы реальные данные об изменении температуры металла, нагреваемого в печи. Промышленные исследования позволяют получить данные об изменении реальной температуры металла по толщине заготовки по мере её продвижения в рабочем пространстве агрегата и на выдаче из него, а также выработать обоснованные и эффективные рекомендации по совершенствованию тепловой работы печи [15].

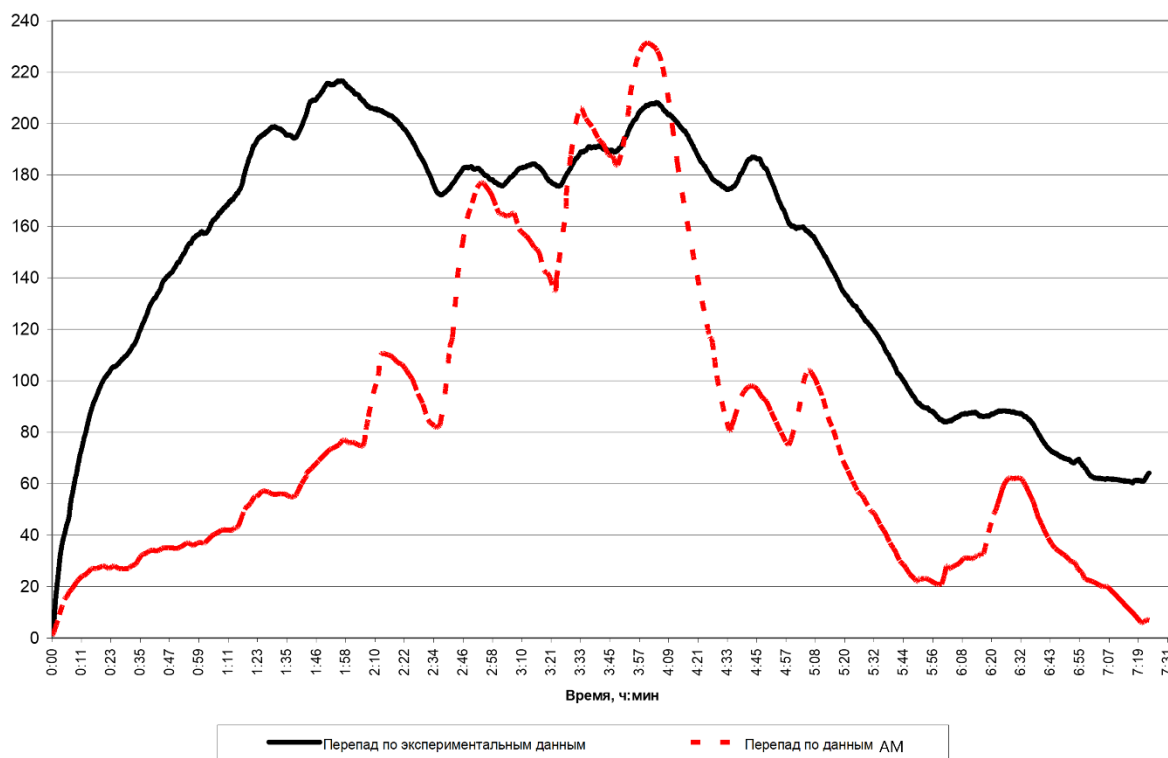


Рис. 1. Сравнение реального и расчётного изменения перепада температуры по толщине сляба в процессе нагрева

Изучение работы проходных печей практически всех широкополосных листовых станов горячей прокатки РФ, позволило получить достаточное количество реализаций процесса нагрева слябов, что обеспечило возможность создания статистической математической модели (СММ). При её разработке использовались результаты экспериментального исследования пятизонных методических печей с шагающими балками с восемью нагревательными подзонами станов 5000 (ВМЗ, ММК) и станов 2000 (НЛМК, Северсталь). Результаты промышленных экспериментов имеют важное значение для понимания того, как работает печь в данный период времени и каким образом осуществляется нагрев слябов, а также появляется возможность использования этих данных для корректировки АММ, которая, как правило, в неизменном виде применяется с момента пуска печи [13]. В рамках статистического моделирования использовался регрессионный анализ – инструмент, который позволил оценить влияние измеряемых независимых переменных на зависимую [16].

На рисунке 2 представлен график нагрева металла в печи стана 5000 с экспериментальными температурными кривыми и значениями температур, рассчитанными при помощи СММ [17] и АММ на выходе из каждой зоны.

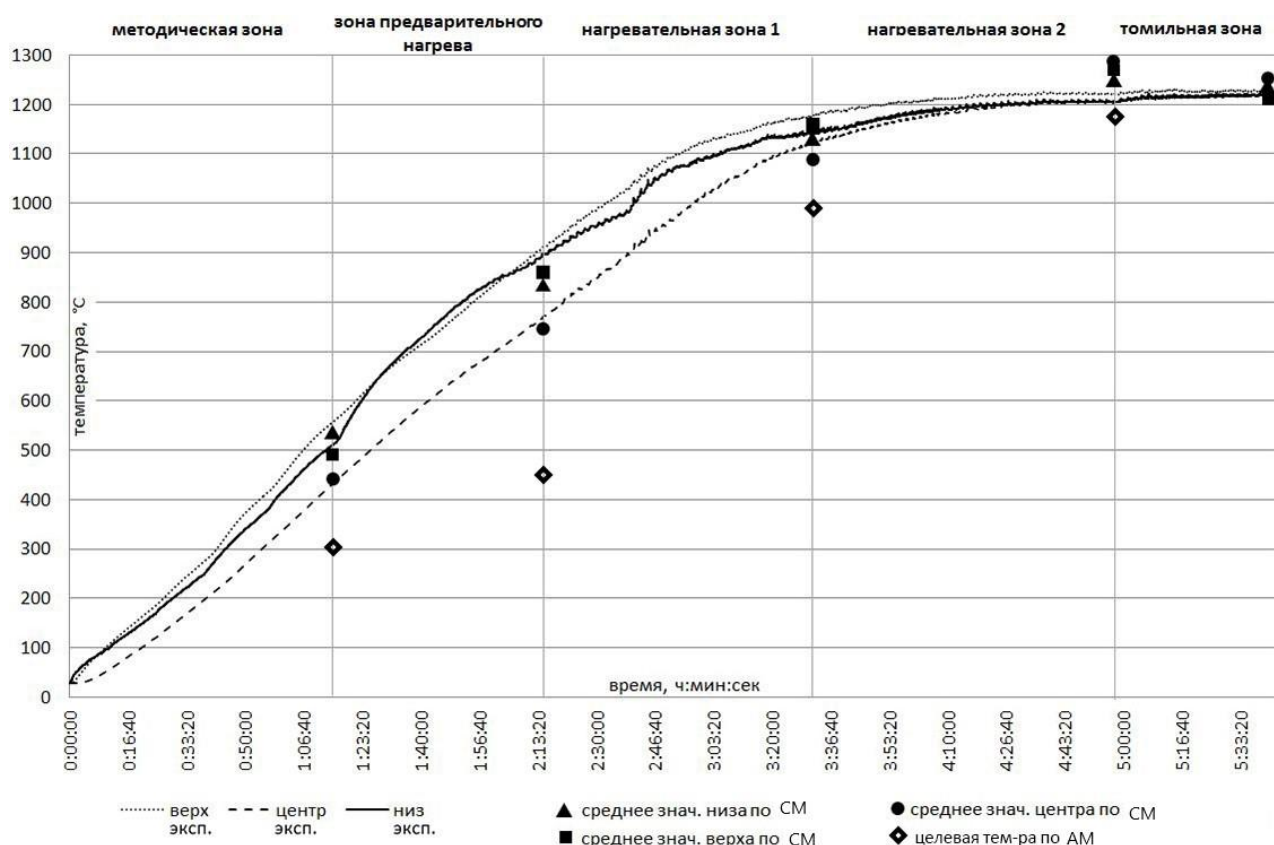


Рис. 2. Сравнение реальных экспериментальных данных нагрева сляба со значениями, рассчитанными по СММ и АММ (стан 5000)

На графике видно, что рассчитанные по СММ значения находятся в пределах допустимого диапазона погрешности, в то время как значения, рассчитанные по АММ в отдельных зонах, отклоняются от действительных на 300 °C. Это в очередной раз доказывает необходимость периодической настройки существующих АММ по результатам реальных нагревов металла.

На данный момент существует большое количество АММ, описывающих теплофизические процессы, однако они имеют ряд недостатков перед статистическими. Несмотря на то, что результаты АММ более наглядны и закономерны, в сравнении со СММ, они описывают процесс нагрева лишь приближённо, учитывая число внешних факторов в узком диапазоне значений и включают ряд допущений и упрощений. При этом СММ, по сравнению с аналитическими, обладают большей точностью и подробностью, т.к. они включают только те параметры, которые контролируются в процессе функционирования агрегата и имеют определяющее влияние на нагрев. Тем не менее статистическое моделирование имеет свои недостатки, среди которых необходимость использования большого объёма аналогичных реализаций исследуемого нагрева.

Комбинированное использование аналитических и статистических моделей способствует получению наилучших результатов при поиске оптимальных режимов нагрева металла. При помощи АММ появляется возможность изучить основные закономерности процесса нагрева и получить приблизительный результат. На основании СММ можно осуществить уточнение АММ. В случае, когда СММ генерирует отличные от АММ результаты, более приближенные к

реальным экспериментальным данным, то может быть разработана система поправок к аналитическому решению в виде эмпирических формул, широко используемых для решения технических задач.

Для поиска оптимальных температурных режимов работы печи на базе СММ целесообразно проводить предварительную оптимизацию на АММ. Это позволит выбрать оптимальное решение в ограниченной области на основе результатов, близких к оптимальным для АММ.

Выводы.

1. Математические модели, являясь важным инструментом познания реального мира, представляют собой один из лучших методов исследования. Адекватная математическая модель позволяет осуществлять многовариантные вычислительные эксперименты и оптимизировать системы.

2. Приведён сравнительный график реальных экспериментальных данных нагрева сляба в проходной печи с шагающими балками и значений, рассчитанных при помощи разработанных статистической и аналитической моделей, используемых на практике. Отклонение рассчитанных по СММ значений находится в допустимом диапазоне, в то время как значения, рассчитанные по АММ для отдельных зон, отличаются на 50–300 °С от реальных, что свидетельствуют о недостаточной адекватности созданной аналитической модели.

3. Комбинированное использование аналитических и статистических моделей способствует наилучшим результатам при поиске и отработке оптимальных режимов нагрева металла.

Список использованных источников

1. Беленький А.М., Бурсин А.Н., Мордовкин Д.С., Улановский А.А., Чибизова С.И. Задачи совершенствования тепловой работы и конструкции нагревательных печей станов горячей прокатки // Тр. XI конгресса прокатчиков: Т.1. – Магнитогорск, 2017. – С. 29-35.

2. Лошкарёв Н.Б., Носков В.А., Дружинин Г.М. Математическая модель нагрева металла в методической печи с шагающими балками // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2018) 17–18 мая 2018 г. – Екатеринбург: УрФУ. – С. 223-228.

3. Антипкина М.Е., Крупенников С.А., Левицкий И.А. Определение оптимальной толщины футеровки нагревательной печи // Новые огнеупоры. 2019. №10. – С. 42-47.

4. Арутюнов В.А., Левицкий И.А., Ибадуллаев Т.Б. Разработка методов математического моделирования теплофизических процессов в топливных промышленных печах // Metallurg. 2011. №1-2. – С. 33-37.

5. Chen Y.W., Chai T.Y. Modelling and prediction for steel billet temperature of heating furnace // International Journal of Advanced Mechatronic Systems. 2010. Vol. 2. № 5-6. – Pp. 342-349.

6. Ginkul S. I., Biryukov A. B., Gnitiev P. A. Predictive Mathematical Model of the Process of Metal Heating in Walking-Beam Furnaces // *Metallurgist*. 2018. №62. – Pp. 15-21.
7. Tang. G, Wu B., Bai D. Modeling of the slab heating process in a walking beam reheating furnace for process optimization // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. № 113(10). – Pp. 1142-1151.
8. Логунова О.С., Агапитов Е.Б., Баранкова И.И., Андреев С.М., Чусавитина Г.Н. Математические модели для исследования теплового состояния тел и управления тепловыми процессами // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 2(43). – С. 25-34.
9. Han S. H., Chang D., Kim C. Y. A numerical analysis of slab heating characteristics in a walking beam type reheating furnace // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. No. 53. – Pp. 3855-3861.
10. Wild D., Meurer T., Kugi A. Modelling and experimental model validation for a pusher-type reheating furnace // *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2009. Vol. 15. – Pp. 209-232.
11. Дождиков В.И., Ганул А.О., Мордовкин Д.С. Оптимизация работы энерготехнологического комплекса нагрева металла перед прокаткой // *Сталь*. 2018. №2. – С. 69-71.
12. Ганул А.О., Дождиков В.И., Мордовкин Д.С. Математическая модель нагрева металла в методической печи с учетом подогрева воздуха // *Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. №1(1). – С. 102-105.
13. Улановский А.А., Тааке М., Беленький А.М., Бурсин А.Н., Чибизова С.И. Использование автономной автоматизированной системы компании Phoenix ТМ для мониторинга температурного поля нагреваемого металла в металлургических печах // *Чёрные металлы*. 2019. №11. – С. 59-64.
14. Бирюков А.Б., Гнитиев П.А. Математические модели тепловой обработки металла в печах // *Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2016. №1(11). – С. 56-62.
15. Беленький А.М., Дубинский М.Ю., Калимулина С.И. Промышленный эксперимент — основа проведения энергосберегающей политики в металлургической теплотехнике // *Металлург*. 2010. №5. – С. 26-29.
16. Радченко Ю.С. Основы статистического моделирования: учебное пособие для вузов. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2010. – 30 с.
17. Беленький А.М., Богатова М.Ж., Чибизова С.И. Статистическое моделирование нагрева металла в печах с шагающими балками // *Чёрные металлы*. 2021. №8. – С. 32-37.