

сероочистку. Реализация проектов внедрения серо-очистного оборудования относительно дорогостоящее мероприятие, но перспектива дальнейшего ухудшения экологической ситуации позволяет расставить приоритеты в сторону защиты экологии несмотря на затраты.

Список использованных источников

1. Велецкий Р.К., Григина Н.Н. Измерение параметров пылегазовых потоков в черной металлургии». – М.: Металлургия, 1979. – 79 с.
2. Берман Ю.А. Основные закономерности производства окатышей. Челябинск: Металлургия, 1991. – 184 с.
3. Копырин И.А., Борц Ю.И., Граур И.Ф. Производство окатышей различной основности. – М.: Металлургия, 1975. – 192 с.
4. Боковиков Б.А., Брагин В.В., Евстюгин С.Н., Малкин В.М., Найдич М.И., Солодухин А.А. Теплофизические закономерности термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине (математическое моделирование). – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. – 200 с.

УДК 621.78.013

М. Ж. Богатова, С. И. Чибизова

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС»», г. Москва, Россия

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ

Аннотация. В статье предложен способ совершенствования тепловой работы нагревательных печей с шагающими балками станов горячей прокатки при помощи статистической математической модели нагрева металла. Объектом исследования является тепловая работа методической печи с шагающими балками для нагрева слябов перед прокаткой. Предметом исследования — статистическое моделирование нагрева металла в печи данного типа. На базе результатов, полученных в ходе проведения 15-ти автоматизированных направленных промышленных экспериментов на методических печах станов горячей прокатки российских металлургических предприятий, разработана статистическая модель, описывающая с допустимой точностью процесс нагрева стальных заготовок. Проведена адаптация статистической модели с использованием результатов промышленных экспериментов. В статье приведен график сравнения реальных и рассчитанных температурных значений на основании штатной математической и разработанной статистической моделей для одного из экспериментов. Сформулированы основные выводы, базирующиеся на результатах проделанного исследования. Впервые в металлургической практике разработана статистическая модель, описывающая процесс нагрева металла в пятизонной методической печи листового стана горячей прокатки с восемью нагревательными подзонами.

Ключевые слова: Математическая модель, статистическая модель, квазидинамическая модель, промышленный эксперимент, печи с шагающими балками.

Abstract. *The article provides a method of mathematical modeling to improve temperature operating modes of heating furnaces' hot strip mills. The object of the research is the thermal operation of a continuous walking beam furnace for heating slabs before rolling. The subject of the research is statistical modeling of metal heating in furnaces of this type. The statistical model is based on the results of 15 automated industrial experiments on Russian heating furnaces' hot strip mills and describes the heating process in walking beam furnace with acceptable accuracy. The adaptation of the statistical model and error calculation has been carried out. The article contains a graph comparing real temperatures and temperatures calculated on the basis of mathematical and statistical models for one of the experiments. The main conclusions are formulated based on the results of the research done. For the first time in metallurgical practice, a statistical model has been developed that describes the process of metal heating in a five-zone continuous furnace with eight heating subzones.*

Key words: *Mathematical model, statistical model, quasi-dynamic model, industrial experiment, walking beam reheating furnace.*

Введение. Повышение энергоэффективности нагревательных печей станов горячей прокатки, важнейшего и наиболее энергоёмкого вида технологического оборудования, является главным инструментом снижения затрат основных производственных ресурсов на российских предприятиях чёрной металлургии [1-3].

Поиск оптимальных тепловых режимов посредством проведения теплотехнических испытаний является главным методом совершенствования технологии нагрева металла в проходных печах. Трудоёмкость процесса обусловлена ограниченностью информации о процессе внутри печи, а выводы, которые формулируются на базе полученных данных, не всегда дают адекватное представление о реальной картине процесса нагрева. Аналитические математические модели (ММ) нагрева [4-6], на основании которых ведётся управление печью, нуждаются в периодической корректировке ввиду изменения параметров агрегата.

Промышленные исследования позволяют получить данные об изменении реальной температуры металла по толщине заготовки по мере её продвижения в рабочем пространстве печи и на выдаче, а также выработать обоснованные и эффективные рекомендации по совершенствованию тепловой работы печи.

В ходе 15-ти промышленных экспериментов была изучена тепловая работа и определено реальное изменение температуры металла в процессе нагрева в методических печах с шагающими балками для станов 5000 (ВМЗ, ММК) и стана 2000 (НЛМК, Северсталь). Результаты экспериментов являются ценной информацией и благодаря исследованию тепловой работы проходных печей станов горячей прокатки большинства крупных российских металлургических предприятий, позволило накопить достаточное количество реализаций процесса нагрева слэбов в печи, что и обеспечило, впервые в металлургической практике, возможность создания статистической математической модели (СММ) [7-8].

Используя СММ можно подобрать наилучшие условия для нагрева стальной заготовки с использованием точно измеренных параметров работы агрегата. Как правило, СММ прогнозирует значение искомых параметров на выходе из печи, т.е. является статической. В данном случае использовались результаты экспериментов на пятизонных проходных печах и значения

температур верхней поверхности, центра и нижней поверхности сляба рассчитывались в конце каждой зоны. Отсюда можно сделать вывод о том, что данная СММ является квазидинамической, т.е. моделью, в которой временной интервал её функционирования делится на периоды, для каждого из которых строится статическая статистическая модель. Таким образом, квазидинамические модели можно рассматривать как совокупность меняющихся и взаимосвязанных статических моделей, в которых определение температурного поля нагреваемого сляба производится в разные моменты времени, связанные с его нахождением в определённой зоне.

Статистическое моделирование позволяет, не осуществляя реальных экспериментов на объекте исследования, получить интересующую актуальную информацию о событиях, которые имеют место на реальном объекте. В рамках статистического моделирования регрессионный анализ является важнейшим исследованием, которое оценивает взаимосвязь между несколькими переменными и влияние независимых переменных на зависимую.

Можно выделить следующие этапы построения статистической математической модели (СММ): отбор факторов модели, построение регрессионной модели, корреляционный анализ и оценка значимости переменных, построение регрессионной модели с учётом скорректированных факторов, получение уравнений регрессии.

На первом этапе создания СММ оценивалось влияние факторов, связанных с текущей зоной, для которой производится построение регрессионной модели [9].

В целях усовершенствования текущих уравнений регрессии и повышения точности СММ, на втором этапе было принято решение проанализировать влияние на характер нагрева в текущей зоне температуры продуктов сгорания, поступающих в исследуемую зону из соседних. Используя уравнение множественной регрессии, а также результаты расчёта коэффициентов после удаления незначимых факторов, были получены регрессионные уравнения для верхней поверхности, центра и нижней поверхности сляба для каждой из пяти зон печи.

Для адаптации модели были использованы результаты экспериментов на печах стана 2000. В таблице 1 представлен сравнительный анализ реальных и расчётных значений температуры, а также абсолютной (A , °C) и относительной (δ , %) погрешностей СММ с учётом и без учёта температуры продуктов сгорания из соседних зон для печи стана 2000.

На рисунке 1 представлен график нагрева металла в печи стана 2000 с экспериментальными температурными кривыми и рассчитанными при помощи СММ значениями температуры металла на выходе из каждой зоны.

Второй этап создания квазидинамической статистической математической модели показал, что температура продуктов сгорания соседних зон имеет значение и в некоторых зонах учёт данного фактора в модели позволил уменьшить значение погрешности вдвое, тем самым повысив точность СММ в целом.

Таблица 1

Сравнительный анализ погрешностей по всем зонам без учёта (Вар. 1)
и с учётом температуры продуктов сгорания из соседней зоны (Вар. 2)
для печи стана 2000

	верх				центр				низ			
	Реальная t, °C	Расчет, °C	A, °C	δ, %	Реальная t, °C	Расчет, °C	A, °C	δ, %	Реальная t, °C	Расчет °C	A, °C	δ, %
методическая зона												
Вар.1	367,9	407,0	-39,1	10,6	324,3	351,1	-26,7	8,2	380,3	432,2	-52,0	13,7
Вар.2		397,2	-29,3	8,0		327,0	-2,7	0,8		421,8	-41,5	10,9
зона предварительного нагрева												
Вар.1	728,9	762,1	-33,1	4,5	627,3	671,9	-44,7	7,1	753,2	819,6	-66,5	8,8
Вар.2		754,8	-25,9	3,6		632,3	-5,0	0,8		785,2	-32,0	4,3
нагревательная зона 1												
Вар.1	1034,3	1078,8	-44,5	4,3	938,3	1006,6	-68,3	7,3	1099,8	1120,3	-20,5	1,9
Вар.2		1064,0	-29,7	2,9		947,1	-8,8	0,9		1097,5	2,3	0,2
нагревательная зона 2												
Вар.1	1213,3	1231,2	-17,9	1,5	1197,2	1205,3	-8,1	0,7	1197,9	1230,4	-32,5	2,7
Вар.2		1222,5	-9,2	0,8		1155,5	41,7	3,5		1215,3	-17,4	1,5
томильная зона												
Вар.1	1206,1	1244,5	-38,5	3,2	1179,0	1213,9	-34,9	3,0	1199,5	1232,8	-33,3	2,8
Вар.2		1239,8	-33,8	2,8		1189,2	-10,2	0,9		1225,1	-25,6	2,1



Рис. 1. Сравнение результатов одного из экспериментов и СММ, учитывающей температуру продуктов сгорания из соседней зоны (стан 2000)

Выводы

1. Создана квазидинамическая статистическая математическая модель нагрева металла в пятизонной (с восемью нагревательными подзонами) проходной нагревательной печи с шагающими балками листового стана горячей

прокатки. Использование квазидинамической модели позволяет рассчитать температуру по сечению заготовки в конце каждой зоны, т.е. фактически проследить процесс нагрева в динамике.

2. Выполнен расчёт относительных погрешностей СММ. Влияние температуры продуктов сгорания соседних зон является весомым фактором, который необходимо учитывать в уравнениях модели. Точность данной ММ удалось повысить на 1-3 % по сравнению с точностью СММ без учёта температуры продуктов сгорания соседних зон.

3. Данный подход является перспективным, т.к. в СММ используются только точно известные характеристики металла и данные о работе печи, полученные в результате штатных измерений.

4. Модель может быть использована для прогнозирования теплового состояния слябов на выходе из зон печи при нагреве по заданному режиму.

Таким образом, создана и адаптирована квазидинамическая СММ нагрева заготовки в печи с шагающими балками. Переход к квазидинамическим математическим моделям усложняет вычислительные процессы, но приводит к повышению точности модели.

Так как функция регрессии определена, интерпретирована и обоснована, а оценка точности регрессионного анализа соответствует требованиям, можно считать, что предложенная СММ и прогнозные значения обладают достаточной надёжностью и являются средними значениями, которые можно ожидать.

Список использованных источников

1 Беленький А.М., Бурсин А.Н., Улановский А.А., Чибизова С.И. Совершенствование тепловой работы нагревательных печей станов горячей прокатки // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. 2015. № 2. С. 62–69.

2 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 // Труды XI конгресса прокатчиков: сб. тр. Т. 1. Магнитогорск, 2017. С. 29–35.

3 Орелкина Д.И., Петелин А.Л., Полулях Л.А., Подгородецкий Г.С. Модель расчёта концентрации вторичных металлургических выбросов в атмосфере // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2016. Т. 59. № 5. С. 300–305.

4 Лошкарев 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) – Екатеринбург: УрФУ, 2018. С. 223–228.

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

6 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.

7 Беленький А.М., Дубинский М.Ю., Калимулина С.И. Промышленный эксперимент – основа проведения энергосберегающей политики в металлургической теплотехнике // Металлург. 2010. № 5. С. 26–29.

8 Беленький А.М., Дубинский М.Ю., Ладыгичев М.Г. Температура: теория, практика, эксперимент. Т. 2. Измерение температуры в промышленности и энергетике. – М.: Теплотехник, 2007. – 736 с.

9 Радченко Ю.С. Основы статистического моделирования: учебное пособие для вузов. – Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2010. – 30 с.

УДК 621.783.231

В. М. Валиахметов, М. Д. Казяев

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМ ПОДОМ ДЛЯ НАГРЕВА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ КВАДРАТНЫХ ЗАГОТОВОК

Аннотация. Сконструирована печь для нагрева непрерывнолитых квадратных заготовок. Данная конструкция печи разделена на 3 зоны, в каждой из которых принята постоянная температура. Дымоудаление осуществляется через рекуперативные горелки, которые оттапливаются природным газом. Подвод газа и воздуха к каждой горелке осуществляется от общих трубопроводов газа и воздуха. Произведен расчет тепловой работы печи, на основе которого были получены основные показатели ее работы.

Ключевые слова: шагающий под, тепловой баланс, непрерывнолитые заготовки, рекуперативная горелка, тепловой и температурный режимы.

Abstract. A furnace is designed for heating continuously cast square blanks. This furnace design is divided into 3 zones, each of which has a constant temperature. Smoke removal is carried out through recuperative burners, which are heated with natural gas. Gas and air supply to each burner is carried out from the common gas and air pipelines. The calculation of the thermal operation of the furnace was made, on the basis of which the main indicators of its operation were obtained.

Key words: a walking hearth, heat balance, continuously cast billets, recuperative burner, thermal and temperature modes.

Современные прокатные станы работают в непрерывном режиме, которые в свою очередь обеспечиваются горячим металлом, нагреваемым в печах непрерывного действия. К таким печам относят проходные или методические печи с различной механизацией: толкательные, печи с шагающим подом и печи с шагающими балками.

В данной представлена проходная печь с шагающим подом, выполненная по новым строительным технологиям с применением волокнистой футеровки и рекуперативных горелок. Печь спроектирована на основе печи,