

УДК 621.78.013

С.И. Гинкул, А.Н. Лебедев, Ю.В. Подобед, Ю.М. Сапронова

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СОРТАМЕНТА НАГРЕВАЕМОГО МЕТАЛЛА

Предложена математическая модель, позволяющая моделировать нагрев металла различного сортамента. В связи с различными производственными условиями на некоторых заводах для обеспечения нормальной производительности прокатных станов приходится работать на привозных заготовках. Моделирование нагрева металла позволяет легко определить необходимое время нагрева и температурное поле металла в процессе нагрева при изменении сортамента.

Ключевые слова: методическая печь, сляб, температура, моделирование, прогонка, дифференциальное уравнение, теплопроводность

Постановка задачи

Методические печи проектируются на обеспечение заданной производительности при нагреве заготовок определенной толщины. С течением времени ситуация в промышленности меняется. В печах, которые были предназначены для нагрева одних заготовок, греются заготовки других типоразмеров, например, привозные из других заводов, на одном заводе используется один вид топлива, на другом заводе применяется другое топливо. В связи с этим возникает задача: разработать математическую модель, которая позволяла бы моделировать режимы нагрева металла для реально существующих печей с учетом возникших требований.

Анализ публикаций по теме исследования

Тепловой работе методических нагревательных печей и расчетов нагрева металла посвящен ряд работ [1], [2]. Методические печи являются высокопроизводительными непрерывнодействующими агрегатами, работающими по принципу противотока. Моделированию нагрева металла в этих печах большое внимание уделено в монографии [3]. При расчете внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи при моделировании нагрева металла определение степени черноты газов, как правило, осуществлялось по номограммам [4]. При разработке математической модели с использованием персонального компьютера такой способ определения степени черноты газов неприемлем. В связи с этим был разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать интенсивность излучения газов по зависимостям, приведенным в работе [5].

Формулировка целей статьи

Нагрев заготовок перед прокаткой должен обеспечить высокие пластические свойства стали и наименьшее сопротивление деформации. В настоящее время практически не строятся методические печи, а использу-

ются имеющиеся. Диапазон использования этих печей увеличивается. В этом случае печи работают зачастую не в проектном режиме, так как топливо, используемое для нагрева заготовок, может быть другим, его радиационные характеристики будут отличаться, толщина заготовок может меняться как в одну, так и в другую сторону.

Цель работы: разработать математическую модель, которая на реально действующей печи позволяла бы выполнить моделирование нагрева металла при условиях, отличающихся от проектных. По результатам моделирования определяется температура газов и температура металла по зонам печи, время нагрева металла.

Основная часть

Заготовки в методической печи лежат вплотную друг к другу. При таком расположении заготовок для моделирования нагрева металла в методической печи воспользуемся дифференциальным уравнением теплопроводности, описывающим одномерное температурное поле, которое в этом случае имеет вид:

$$c(t)\rho(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right], \quad (1)$$

где $\lambda(t)$, $c(t)$, $\rho(t)$ соответственно коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{(\text{мК})}$; теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{(\text{кгК})}$; плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

В методической и сварочной зонах нагрев заготовок осуществляется с двух сторон. Интенсивность нагрева сверху выше, чем снизу, т.е. нагрев является несимметричным. В томильной зоне металл, лежащий на монолитном поду, греется при постоянной температуре поверхности $t_{\text{пк}}$, равной конечной температуре поверхности металла.

Исходя из геометрии методической и сварочной зон и температуры газов в этих зонах, определяются коэффициенты теплоотдачи излучением для верхних и нижних зон [6]. Коэффициенты теплоотдачи излучением при меняющейся температуре газов по длине печи вычисляются по формуле

$$\alpha_{\text{изл}} = 10^{-8} c_0 \sqrt{\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{н}} \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{к}} (T_{\text{гн}} + T_{\text{мн}})(T_{\text{гн}}^2 + T_{\text{мн}}^2)(T_{\text{гк}} + T_{\text{мк}})(T_{\text{гк}}^2 + T_{\text{мк}}^2)}, \quad (2)$$

при постоянной температуре газов по длине печи

$$\alpha_{\text{изл}} = 10^{-8} c_0 \varepsilon_{\text{пр}} \sqrt{(T_{\text{г}} + T_{\text{мн}})(T_{\text{г}}^2 + T_{\text{мн}}^2)(T_{\text{г}} + T_{\text{мк}})(T_{\text{г}}^2 + T_{\text{мк}}^2)}, \quad (3)$$

где c_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}^4}$; $T_{\text{гн}}, T_{\text{гк}}$ - температура газа в начале и в конце методической зоны, К; $T_{\text{г}}$ - температура газа по длине сварочной зоны, К; $T_{\text{мл}}, T_{\text{мк}}$ - температура металла в начале и конце зоны, К; $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{H}}, \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{K}}, \varepsilon_{\text{пр}}$ - приведенная степень черноты системы в начале и конце методической зоны, по длине сварочной зоны.

Приведенная степень черноты системы определяется по формуле

$$\xi_{\delta} = \xi \frac{\omega + 1 - \xi_a}{\left[\xi + \xi_a (1 - \xi) \right] \frac{1 + \xi_a}{\xi} + \omega} \quad (4)$$

где ω - степень развития кладки; $\varepsilon_{\text{м}}, \varepsilon_{\text{г}}$ - степень черноты металла и газа.

Степень черноты поддувков сгорания рассчитывается по формуле [5]

$$\varepsilon_{\text{г}} = 1 - \exp(-K_{\text{г}} \cdot \ell_{\text{эф}}), \quad (5)$$

где $\ell_{\text{эф}}$ - эффективная длина газа в газовых объемах, м; $K_{\text{г}}$ - коэффициент поглощения.

Коэффициент поглощения среды

$$\hat{E}_{\text{а}} = \left(\frac{0,78 + 1,6 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_{\text{г}} \ell_{\text{эф}}}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{\dot{Q}_{\text{а}}}{1000} \right) r_{\text{н}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{г}}$ - температура уходящих из камеры газов, К; $p_{\text{н}} = p \cdot r_{\text{н}}$ - суммарное парциальное давление трехатомных газов; $r_{\text{н}} = r_{\text{CO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}$ - их объемная доля.

По данному математическому описанию составлена программа для расчета степени черноты газов для каждой зоны методической печи. Использование приведенных аналитических зависимостей упростило нахождение степени черноты газов по сравнению с номограммами. Исключение определения газов по номограммам позволило автоматизировать вычисление степени черноты.

Для получения однозначного решения дифференциального уравнения

(1) необходимо задать краевые условия:

$$\text{начальные условия при } \tau=0 \quad t=f(x); \quad (7)$$

граничные условия

$$\text{при } x=0 \quad q = \alpha_{\text{изл}}^{\text{В}} (t_{\text{гв}} - t_{\text{пв}}); \quad (8)$$

$$\text{при } x=\ell x \quad q = \alpha_{\text{изл}}^{\text{H}} (t_{\text{гн}} - t_{\text{пн}}),$$

где $\alpha_{\text{изл}}^{\text{В}}, \alpha_{\text{изл}}^{\text{H}}$ - коэффициенты теплоотдачи излучением в верхней и нижней зонах, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$; $t_{\text{гв}}, t_{\text{гн}}$ - температура газов в верхних и нижних зонах, °С; $t_{\text{пв}}, t_{\text{пн}}$ - температура поверхности металла в верхних и нижних зонах, °С.

Дифференциальное уравнение (1) с начальными (7) и граничными (8) условиями решалось конечно-разностным методом с использованием ме-

тогда прогонки [7]. Температура поверхности заготовки определяется из выражений:

$$\text{для верхних зон} \quad t_1^{\tau+\Delta\tau} = \alpha_1 t_2^{\tau+\Delta\tau} + v_1, \quad (9)$$

$$\text{для нижних зон} \quad t_n^{\tau+\Delta\tau} = \alpha_2 t_{n-1}^{\tau+\Delta\tau} + v_2 \quad (10)$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{\text{св}}^{\text{а}} \cdot \Delta r}{\lambda} + \frac{\Delta r^2}{2a \Delta \tau}}; \quad \alpha_2 = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{\text{св}}^{\text{д}} \cdot \Delta r}{\lambda} + \frac{\Delta r^2}{2a \Delta \tau}} \quad (11)$$

$$v_1 = \alpha_1 \left(\frac{\alpha_{\text{изл}}^{\text{в}} \cdot \Delta r}{\lambda} \cdot t_{\text{ГВ}} + \frac{\Delta r^2}{2a \Delta \tau} \cdot t_1^{\tau} \right), \quad (12)$$

$$v_2 = \alpha_2 \left(\frac{\alpha_{\text{изл}}^{\text{н}} \cdot \Delta r}{\lambda} \cdot t_{\text{ГН}} + \frac{\Delta r^2}{2a \Delta \tau} \cdot t_n^{\tau} \right), \quad (13)$$

где Δr - шаг по координате, м; a - коэффициент температуропроводности, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $t^{\tau+\Delta\tau}$, t^{τ} - температура металла в момент времени $\tau + \Delta\tau$ и в момент времени τ .

Рассматривался нагрев слябов размерами $l_x * l_y * l_z$ в методической печи, ширина и длина слябов оставались постоянными $l_y = 1,4$ м, $l_z = 10,5$ м, а толщина изменялась в пределах 0,3...0,4 м. Изменения толщины слябов приводило к изменению времени нагрева в соответствии с формулой:

$$\tau = \frac{G}{P}, \quad (14)$$

где G - масса металла в печи, кг; P - производительность, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$.

В таблице 1 приведено время нагрева заготовок для конкретных условий.

Таблица 1. Суммарное время нагрева заготовок в методической печи в зависимости от толщины заготовок

Толщина заготовки, м	0,3	0,33	0,36	0,4
Время нагрева, с	11420	12560	13700	15220

В таблице 2 приводится значение температуры поверхности металла при одном и том же режиме печи и различной толщине сляба.

В связи с увеличением толщины заготовок время пребывания металла в печи возрастает, что приводит к увеличению температуры на поверхности (таблица 2). При расчете принималось, что температура начала пластической деформации $t_{p\ell} \geq 500^\circ\text{C}$.

Таблица 2. Изменение температуры поверхности металла при постоянном температурном режиме по длине печи и различной толщине слябов.

Толщина заготовки, м	Температура газов по зонам печи, °С						
	Методическая		1-ая сварочная		2-ая сварочная		Томильная
	начало	конец	начало	конец	начало	конец	
	1050	1300	1300	1300	1350	1350	
Температура поверхности металла по зонам, °С							
0,3	0	562	562	1045	1045	1224	1249
0,33	0	569	569	1047	1047	1223	1249
0,36	0	576	576	1049	1049	1222	1248
0,40	0	585	585	1052	1052	1221	1248

Для всех размеров заготовок температура поверхности в конце методической зоны превышает 500°С. В томильной зоне металл нагревается при постоянной температуре поверхности, которая принималась равной $t_{\text{пк}} = 1250^{\circ}\text{C}$. Полученная температура поверхности металла в томильной зоне соответствует заданной точности.

Выводы

Таким образом, разработана математическая модель и выполнено моделирование нагрева металла при постоянной производительности печи и различной толщине заготовок. Изменение толщины заготовок приводит к изменению времени нагрева. Показано, что для рассмотренного диапазона толщин, имеющийся температурный режим печи позволяет нагревать заготовки с заданным качеством. Моделирование нагрева металла позволяет рассчитывать температурное поле металла при различной толщине, что особенно важно в настоящее время, когда прокатные станы не получается загрузить «своими» заготовками, а приходится работать на покупных заготовках, которые могут быть различного сортамента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вырк А.Х. Использование ЭВМ для автоматизации методических печей за рубежом / А.Х. Вырк, Т.К. Захаров, М.В. Климовицкий // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. – 1973. - №3 - С.3-11.
2. Применение ЭВМ для расчета нагрева металла в методических печах / Е.И. Казанцев, С.И. Гинкул, В.В. Антонов, Н.В. Гончаров // Сталь. – 1973. - №1 - С.77-79.
3. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко. – К.: Наукова думка, 2008.-243с.
4. Казанцев Е.И. Промышленные печи / Е.И.Казанцев. - М.:Металлургия, 1975.-368 с.
5. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ю.И. Розенгард, Б.Б. Потапов, В.М. Ольшанский, А.В. Бородулин. – К., Донецк: Вища школа, 1986. – 296с.

6. Мاستрюков В.С. Теория, конструкция и расчеты металлургических печей / В.С. Мастрюков. - М: Металлургия, 1986. - Т.2. -376 с.
7. Тепломассообмен / С.И. Гинкул, В.И. Шелудченко, В.В. Кравцов, С.В. Палкина. - Донецк: Норд-Пресс, 2006 – 298с.

Поступила в редакцию 30.06.2010

Рецензент д-р техн. наук, проф. В.В. Кравцов

© Гинкул С.И., Лебедев А.Н., Подобед Ю.В.,
Сапронова Ю.М., 2010

УДК 621.783.223

В.В. Кравцов, А.Б. Бирюков, И.И. Демир

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА НАГРЕВА В ПРОХОДНЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

В статье было рассмотрено применение нового оптимального энергосберегающего режима нагрева металла в проходных печах, целью которого является уменьшение энергозатрат при нагреве металла в нагревательных проходных печах. Приведен новый алгоритм расчета энергосберегающего режима нагрева и представлены сравнительные данные стандартного и нового режимов нагрева.

Ключевые слова: импульсная подача, волнообразные колебания, комбинированное отопление, оптимальный температурный режим.

Введение

Украина – энергодефицитное государство. Собственными ресурсами оно обеспечивает свои потребности всего на 53%. Черная металлургия — одна из наиболее энергоемких отраслей промышленности Украины. Доля затрат на топливо в общих заводских затратах на производство продукции составляет более 30 %. На сегодняшний день существует значительный моральный и физический износ основного оборудования и наблюдается существенная неритмичность работы металлургических предприятий, связанная с особенностью современного рынка продукции. Эти два фактора в основном определяют значительную часть потерь при производстве. Высокая энергоемкость металлургических производств при постоянном росте цен на топливо ставит на одно из первых мест проблемы энерго- ресурсосбережения. Одним из наиболее крупных потребителей топлива в металлургии является прокатное производство.

Нагревательные печи относятся к основному оборудованию прокатных цехов. От их работы в значительной степени зависят объем, качество и экономичность производства проката. В большинстве случаев ошибки, возникающие при нагреве металла, уже не могут быть исправлены.