

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

(ДонНТУ, г. Донецк)

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.

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 используются 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; $T_{\text{МН}}, T_{\text{МК}}$ - температура металла в начале и конце зоны, К; $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{Н}}, \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{К}}, \varepsilon_{\text{пр}}$ - приведенная степень черноты системы в начале и конце методической зоны, по длине сварочной зоны.

Приведенная степень черноты системы определяется по формуле

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{М}} \frac{\omega + 1 - \varepsilon_{\text{Г}}}{[\varepsilon_{\text{М}} + \varepsilon_{\text{Г}}(1 - \varepsilon_{\text{М}})] \frac{1 + \varepsilon_{\text{Г}}}{\varepsilon_{\text{Г}}} + \omega},$$

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

Степень черноты продуктов сгорания рассчитывается по формуле [5]

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

где $\ell_{\text{эф}}$ - эффективная длина газа в газовых объемах, м;

$K_{\text{Г}}$ - коэффициент поглощения.

Коэффициент поглощения среды

$$K_{\text{Г}} = \left(\frac{0,78 + 1,6 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_{\text{п}} \ell_{\text{эф}}}} - 0,1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T_{\text{Г}}}{1000} \right) r_{\text{п}},$$

где $T_{\text{Г}}$ - температура уходящих из камеры газов, К; $p_{\text{п}} = p \cdot r_{\text{п}}$ - суммарное парциальное давление трехатомных газов; $r_{\text{п}} = r_{\text{CO}_2} + r_{\text{H}_2\text{O}}$ - 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:

$$\text{начальные условия при } \tau=0 \quad t=f(x); \quad (4)$$

граничные условия

$$\begin{aligned} \text{при } x=0 \quad q &= \alpha_{\text{изл}}^{\text{В}} (t_{\text{ГВ}} - t_{\text{ПВ}}); \\ \text{при } x=\ell x \quad q &= \alpha_{\text{изл}}^{\text{Н}} (t_{\text{ГН}} - t_{\text{ПН}}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{изл}}^{\text{В}}, \alpha_{\text{изл}}^{\text{Н}}$ - 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 (4) и граничными (5) условиями решалось конечно-разностным методом с использованием метода прогонки [7]. Температура поверхности заготовки определяется из выражений:

$$\begin{aligned} \text{для верхних зон} \quad t_1^{\tau+\Delta\tau} &= \alpha_1 t_2^{\tau+\Delta\tau} + v_1, \\ \text{для нижних зон} \quad t_n^{\tau+\Delta\tau} &= \alpha_2 t_{n-1}^{\tau+\Delta\tau} + v_2 \end{aligned}$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{\text{изл}}^{\text{в}} \cdot \Delta r}{\lambda} + \frac{\Delta r^2}{2a\Delta\tau}}; \quad \alpha_2 = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{\text{изл}}^{\text{н}} \cdot \Delta r}{\lambda} + \frac{\Delta r^2}{2a\Delta\tau}}$$

$$\begin{aligned} v_1 &= \alpha_1 \left(\frac{\alpha_{\text{изл}}^{\text{в}} \cdot \Delta r}{\lambda} \cdot t_{\text{гв}} + \frac{\Delta r^2}{2a\Delta\tau} \cdot t_1^{\tau} \right), \\ v_2 &= \alpha_2 \left(\frac{\alpha_{\text{изл}}^{\text{н}} \cdot \Delta r}{\lambda} \cdot t_{\text{гн}} + \frac{\Delta r^2}{2a\Delta\tau} \cdot t_n^{\tau} \right), \end{aligned}$$

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 $0,3 \dots 0,4$ м. Изменения толщины слябов приводило к изменению времени нагрева в соответствии с формулой:

$$\tau = \frac{G}{P},$$

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.

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

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

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., Захаров Т.К., Климовицкий М.В. Использование ЭВМ для автоматизации методических печей за рубежом. //Черная металлургия. Бюллетень науч.-техн. Информ. 1973.3. - с. 3-11.
2. Казанцев Е.И., Гинкул С.И., Антонов В.В., Гончаров Н.В. Применение ЭВМ для расчета нагрева металла в методических печах //Сталь. 1973,1, с.77-79.
3. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. - К.: Наукова думка, 2008.-243 с.

4. Казанцев Е.И. Промышленные печи. - М.:Металлургия, 1975.-368 с.
5. Розенгард Ю.И., Потапов Б.Б., Ольшанский В.М., Бородулин А.В. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. Киев; Донецк: Вища шк.,1986.-296 с.
6. Мастрюков В.С. Теория, конструкция и расчеты металлургических печей. Т.2 - М: Metallurgy, 1986. -376 с.
7. Гинкул С.И., Шелудченко В.И., Кравцов В.В., Палкина С.В. Тепломассообмен - Донецк: Норд-Пресс, 2006-298 с.