

УДК 669.04

С.И. Гинкул, Ю.В. Подобед

Донецкий национальный технический университет

РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ НАГРЕВА МЕТАЛЛА ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ МАССЕ ЗАГОТОВОК В МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Методичні нагрівальні печі у зв'язку зі зменшенням кількості металу, що плавиться, працюють не на повну потужність. У багатьох випадках для їх довантаження використовують «купований» метал. Такий метал, що поступає з інших заводів, за сортаментом може відрізнятися від того, котрий випускається на даному заводі. Час нагрівання залежить від сортаменту завезених заготовок та їх теплофізичних властивостей. Для скорочення часу на перенастроюку нагрівальної печі на роботу з іншим сортаментом і маркою сталі доцільно провести моделювання роботи печі.

Ключові слова: методична нагрівальна піч, режими нагрівання, моделювання роботи печі.

Методические нагревательные печи в связи с сокращением количества выплавляемого металла работают не на полную производительность. Во многих случаях для их загрузки используют «покупной» металл. Металл, поступающий с других заводов, по сортаменту может отличаться от выпускаемого на данном заводе. Время нагрева заготовок зависит от сортамента привезенных заготовок и их теплофизических свойств. Для сокращения времени на перестройку нагревательной печи на работу с другим сортаментом и маркой стали целесообразно выполнить моделирование работы печи.

Ключевые слова: методическая нагревательная печь, режимы нагрева, моделирование работы печи.

The methodical heating furnaces work with limited output power due to the decreasing of the mass of metal which is put in them for melting. In many cases for their loading the so-called purchased metal is used. Such metal is obtained from different industrial plants and can differ from those one, which is produced at a given plant. It is known that period of heating depends upon the thermophysical properties of delivered metal. In order to reduce the time on reconfiguration of furnace according to different grade of metal it is necessary to perform a proper modeling of a furnace.

Key words: methodical furnace, modes of heating, modeling of heating process.

Постановка задачі. Сущестующіє нагрівальніє печі проєктиривались більше 30 лет назад под конкретний сортамент металла с основним требованиєм – обеспеченіє максимальной производительности. Температурные режимы рассчитывали так же на максимальную производительность. Эксплуатировать печь таким образом экономически целесообразно только в том случае, если её производительность колеблется в узком диапазоне и близка к расчетной.

В современных условиях сокращено количество выплавляемого металла. В имеющихся печах греются заготовки других типоразмеров, используется другое топливо. В связи с этим целесообразно разработать математическую модель и алгоритм, смоделировать режим нагрева заготовок данного сортамента, определить расход топлива на нагрев, удельный расход топлива и удельный расход условного топлива.

Анализ публикаций по теме исследования. Конструкциям и расчетам методических печей, а так же их тепловым режимам и моделированию нагрева металла уделено большое внимание в работах [1 – 5]. Расчет степени черноты газов по методике, изложенной в [3], не позволяет автоматизировать процесс определения степени черноты. Степени черноты газов H_2O и CO_2 необходимо определять по номограммам. Приведенные в [2] аналитические зависимости позволяют разработать

алгоритм расчета степени черноты газов в зависимости от парциального давления, эффективной толщины газового слоя и температуры газов.

Разработка энергосберегающего режима нагрева металла и моделирование нагрева слябов в методических печах выполнено в [4; 5]. В [4] для моделирования нагрева сляба была создана трехмерная геометрическая и конечно-элементная модель сляба, трубы и рейтера, задавались граничные условия теплообмена. При этом считалось, что теплообмен с внешней средой происходит на верхней, нижней и торцевой гранях сляба. Для расчета рационального температурного режима нагрева металла в [5] принялись условия, что минимальные значения температуры уходящих газов и расхода топлива осуществляются при линейном изменении среднemasсовой температуры металла в координатах: температура металла и время его нагрева.

Формулировка целей статьи. Нагрев заготовок в методических нагревательных печах должен обеспечивать заданное качество нагрева металла (в конце методической зоны температура по толщине заготовки должна превышать температуру пластичности, во избежание возникновения в металле термических напряжений, поскольку в сварочной зоне происходит интенсивный нагрев металла). В конце сварочной зоны температура поверхности металла должна быть равной температуре выдачи металла из печи. Цель работы: разработать математическую модель нагрева металла в методической печи, которая на реально действующей печи позволит рассчитывать режимы нагрева металла при различном сортаменте и любой марке стали, отличающихся от проектных [6]. При использовании различного вида топлива необходимо рассчитать радиационные характеристики продуктов сгорания.

Основная часть. Методическая печь является высокотемпературной технологической установкой, предназначенной для нагрева заготовок под прокатку. Конструктивно печь состоит из трех зон – методической, сварочной (верхней и нижней) и томильной. В печи заготовки лежат вплотную друг к другу. В методической и сварочной зонах они перемещаются по глиссажным водоохлаждаемым трубам. В этих зонах имеет место двусторонний несимметричный нагрев металла, поскольку, его интенсивность сверху выше, чем снизу. В томильной зоне металл, лежащий на монолитной подине, греется сверху (выдерживается при постоянной температуре поверхности заготовки). Температурное поле заготовки изменяется по толщине и во времени. Для моделирования нагрева металла в методической печи воспользуемся дифференциальным уравнением теплопроводности, описывающим одномерное температурное поле:

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

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

За начальные условия принимаем распределение температуры по сечению заготовки в начальный момент времени, то есть при $\tau = 0$ $t = f(x)$.

Граничные условия имеют вид:

В методической и сварочной зонах

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0 \quad -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} &= \alpha_{\theta} (t_{2\theta} - t_{н\theta}); \\ \text{при } x = l_x \quad \lambda \frac{\partial t}{\partial x} &= \alpha_{н} (t_{2н} - t_{нн}); \end{aligned} \quad (2)$$

В томильной зоні метал тріється при постійній температурі поверхні.

На рис. 1 приведена схема розположення заготовок по довжині печі.

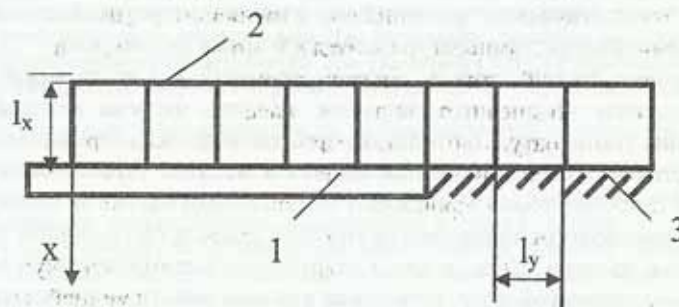


Рис. 1. Схема розположення заготовок в печі:

1 – глиняна труба; 2 – заготовки; 3 – монолітний під.

Різні конфігурації методическої і зварочної зон і різні температури продуктів згорання обумовлює різні значення коефіцієнтів теплоотдачі ізлученням [7]. Коефіцієнти теплоотдачі ізлученням при змінній температурі газів по довжині зони визначаються по залежності:

$$\alpha_{изл} = 10^{-8} \cdot C_0 \sqrt{\varepsilon_{пр}^н \varepsilon_{пр}^к (T_{2н} + T_{2к}) (T_{2н}^2 + T_{2к}^2) (T_{2к} + T_{мк}) (T_{2к}^2 + T_{мк}^2)}. \quad (3)$$

При постійній температурі газів по довжині зони

$$\alpha_{изл} = 10^{-8} \cdot C_0 \varepsilon_{пр} \sqrt{(T_2 + T_{мн}) (T_2^2 + T_{мн}^2) (T_2 + T_{мк}) (T_2^2 + T_{мк}^2)}, \quad (4)$$

де C_0 – коефіцієнт ізлучення абсолютно чорного тіла, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$; $T_{2н}$, $T_{2к}$ – температура газу в началі і кінці методическої зони, $К$; T_2 – температура газу по довжині зварочної зони, $К$; $T_{мн}$, $T_{мк}$ – температура металу в началі і кінці зони, $К$.

Приведенная степен ь черноты зависит от степени развития кладки, степени черноты металу и продуктів згорання и определяется по формуле

$$\varepsilon_{пр} = \varepsilon_M \frac{\omega + 1 - \varepsilon_2}{[\varepsilon_M + \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_M)] \cdot \frac{1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_2} + \omega}, \quad (5)$$

де ω – степен ь развития кладки, $\varepsilon_M, \varepsilon_2$ – соответственно степен ь черноты металу и продуктів згорання.

Степен ь черноты продуктів згорання рассчитывается по формуле [2]

$$\varepsilon_2 = 1 - \exp(-K_2 \cdot l_{\text{эф}}), \quad (6)$$

где $l_{\text{эф}}$ – эффективная длина газа в газовых объемах, м; K_2 – коэффициент поглощения, определяющийся по следующей формуле:

$$K_2 = \left(\frac{0,78 + 1,6 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{P_n \cdot l_{\text{эф}}}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T_2}{1000} \right) \cdot r_n, \quad (7)$$

где T_2 – температура уходящих из камеры газов, К; $P_n = p \cdot r_n$ – суммарное парциальное давление трехатомных газов; $r_n = r_{\text{CO}_2} \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}$ – объемные доли трехатомных газов.

Расчет горения топлива выполняется по отдельной процедуре и позволяет определить требуемое количество кислородоносителя для сжигания топлива, выход продуктов сгорания и их состав. Эти данные используются для расчета приведенной черноты системы. Дифференциальное уравнение (1) с условиями однозначности и граничными условиями (2) решалось конечно-разностным методом с использованием метода прогонки [8; 9].

Производительность печи определяется производительностью прокатного стана. При постоянной производительности время нагрева будет зависеть от массы нагреваемых заготовок

$$\tau = \frac{G}{P}, \quad (8)$$

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

Для имеющейся печи при известных длинах зон можно определить время нагрева металла по зонам, воспользовавшись формулой (8).

Для проверки адекватности математической модели в качестве экспериментальных данных были приняты результаты расчета, приведенные в [7]. Рассматривался нагрев слябов размерами $l_y \times l_x \times l_z$ в методической печи, ширина и длина слябов оставались постоянными $l_y = 1,4$ м, $l_z = 10,5$ м, а толщина – варьировалась.

В этом случае количество заготовок в печи оставалось неизменным, а масса заготовок изменялась в зависимости от толщины сляба l_x . Изменение толщины сляба приводило к изменению и времени нагрева. В табл. 1 приведено изменение времени нагрева в зависимости от толщины сляба.

Таблица 1

Изменение времени нагрева в зависимости от толщины заготовок

Толщина заготовки, м	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27
Время нагрева, с	5756	6853	8058	9202	10280

На рис. 2 приведены результаты нагрева заготовки толщиной 240 мм при двух режимах: обычном и предложенном.

Как видно из рис. 2, при предложенном режиме температуры газов в методической зоне меньше, чем температуры газов в этой же зоне при обычном режиме, что обеспечивает нагрев заготовки до температуры, выше которой начинается пластическая деформация.

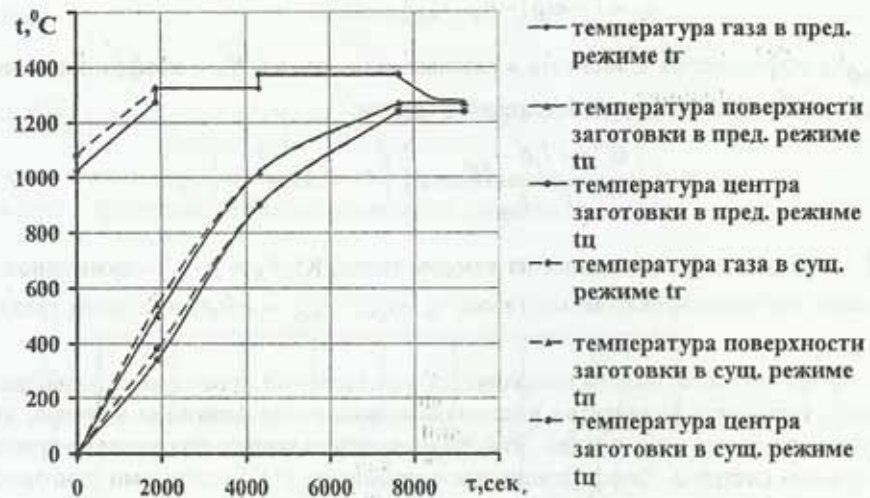


Рис. 2. Сравнение существующего режима с предлагаемым для нагрева заготовки толщиной 240 мм.

Таблица 2
Сравнение экономических показателей работы печи при нагреве заготовок толщиной 240 мм и 210 мм при двух режимах (обычном и рекомендуемом)

Толщина заготовки, мм	Обычный режим			Предлагаемый режим		
	расход топлива, $\text{В, м}^3/\text{с}$	тепловая мощность $M_{\text{общ}} \cdot 10^{-5}, \text{Вт}$	удельный расход условного топлива, $b_{\text{усл}}, \text{кг.у.т/т}$	расход топлива, $\text{В, м}^3/\text{с}$	тепловая мощность $M_{\text{общ}} \cdot 10^{-5}, \text{Вт}$	удельный расход условного топлива, $b_{\text{усл}}, \text{кг.у.т/т}$
210	5,435	1,135	53,63	5,357	1,118	52,86
240	5,451	1,138	53,79	5,288	1,104	52,18

Предлагаемые температуры газов по зонам печи приведены в табл. 3.

Таблица 3
Предлагаемые температуры газов по зонам печи

Толщина заготовки, мм	Температуры по зонам печи					
	методическая		1-ая сварочная		2-ая сварочная	
	начало	конец	начало	конец	начало	Конец
210	1045	1295	1325	1325	1375	1375
240	1025	1275	1325	1325	1375	1375

Большее падение температуры газов по длине методической зоны для заготовки толщиной 240 мм, нежели для заготовки толщиной 210 мм (табл. 2), приводит к лучшим экономическим показателям (табл. 3).

Выводы. Таким образом, в результате выполненных исследований разработан алгоритм и выполнено моделирование нагрева металла при постоянной производительности печи и различной толщине заготовки. Изменение толщины заготовки приводит к изменению времени нагрева, что, в соответствии с полученными результатами, может достигаться изменением времени пребывания металла в зонах печи. Это, в свою очередь, приводит к изменению скорости продвижения металла в печи. Изменение температурного режима приводит к изменению экономических показателей работы печи.

В дальнейшем планируется выполнить исследование на реальной методической печи не только при постоянной производительности, но и при переменной.

Библиографические ссылки

1. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко. – К., 2008. – 244 с.
2. Розенгарт Ю.И. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ю.И. Розенгарт, Б.Б. Потапов, В.М. Ольшанский, А.В. Бородулин. – Киев: Донецк, 1986. – 296 с.
3. Казанцев Е.И. Промышленные печи / Е.И. Казанцев – М., 1975. – 368 с.
4. Найзабеков А.Б. Моделирование нагрева слябов в методических печах различной конструкции / А.Б. Найзабеков, В.А. Талмазан, Н.В. Ахметгалина // Сталь. – 2010. – №6. – С. 66–69.
5. Пульпинский В.Б. Разработка и внедрение энергосберегающего режима нагрева металла в проходных печах методического типа / В.Б. Пульпинский // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». 2005. – №5. – С. 31–38.
6. Гинкул С.И. Моделирование нагрева металла при переменной массе заготовок в методической печи / С.И. Гинкул, А.Н. Лебедев, Ю.В. Подобед // Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу : матер. міжнар. наук. конф. – Д., 2010. – С. 115–118.
7. Мастрюков Б.С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей, т.2 / Б.С. Мастрюков – М., 1986. – 376 с.
8. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем / А.А. Самарский. – М., – 1971. – 552 с.
9. Гинкул С.И. Тепломассообмен / С.И. Гинкул, В.И. Шелудченко, В.В. Кравцов, С.В. Палкина. – Донецк, 2006. – 298 с.

Надійшла до редколегії 27.12.10

УДК 519.6

Д. В. Евдокимов, Н. В. Поляков, Д. Н. Сербиченко
Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА БИОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

На базі аналізу математичної моделі тепломасопереносу в процесі метаболізму біологічного об'єкта розвинуто нову асимптотичну модель процесу росту біологічних структур. Запропоноване наближення проілюстроване декількома прикладами чисельного розв'язку.