

Ф.В. Недопьокін, О.О. Петренко
Донецький національний університет, Донецьк

ФАЗОВИЙ ПЕРЕХІД ПЛАВЛЕННЯ – КРИСТАЛІЗАЦІЯ ЯК АНАЛОГ МАРТЕНСИТНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ПОБЛИЗУ ТЕМПЕРАТУРИ ПЛАВЛЕННЯ

Досліджено утворення твердої фази з розплаву як процес, що протікає аналогічно мартенситним перетворенням твердої фази, тобто зі швидкістю поширення звуку і циклічно. Принципова відмінність запропонованої моделі полягає в тому, що кристалізація здійснюється при постійному переохолодженні для кожної речовини. Наводяться отримані теоретичним шляхом формули для розрахунку основних параметрів кристалізації та приклади конкретних розрахунків для конкретних речовин.

Ключові слова: вибухова кристалізація, одиничний акт кристалізації, передкристалізаційне охолодження, швидкість і час кристалізації.

F.V. Nedopekin, A.A. Petrenko
Donetsk National University, Donetsk

PHASE TRANSITION “FUSION – CRYSTALLIZATION” AS AN ANALOG OF THE MARTENSITIC TRANSFORMATIONS CLOSE TO MELTING TEMPERATURE

Melt transition to the solide phase is studied as a process similar to martensite transformations of the solid phase, i.e. it is cyclical and takes place with the speed of sound. The basic peculiarity of the suggested model is that crystallization takes place with constant supercooling for each substance. Theoretically derived formulas for calculating the basic crystallization parameters and the examples of specific calculations for particular substances are provided.

Keywords: crystallization, precrystallization super-cooling, crystallization speed and time.

УДК 621.78.013

С.И. ГИНКУЛ (канд.техн.наук, проф.), **А.И. ТУЯХОВ** (канд.техн.наук,
проф.), **Ю.С. СИБИРЦЕВА**

Донецкий национальный технический университет, Донецк

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ НАГРЕВЕ МЕТАЛЛА РАЗЛИЧНОГО СОРТАМЕНТА

Предложена математическая модель нагрева заготовок квадратного или прямоугольного сечения в методической нагревательной печи в переходном режиме, когда в печи одновременно нагреваются две партии заготовок различного поперечного сечения движущихся одна за другой. Математическое моделирование даёт возможность определить температурный режим по длине печи, обеспечивающий получение значений параметров, отвечающих принятой технологии нагрева для двух партий заготовок, различающихся как по поперечному сечению, так и по составу.

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

Постановка задачи

Методические печи толкательного типа работают непрерывно только при полном заполнении рабочего пространства нагревательными заготовками. На некоторых заводах при выполнении заказа на небольшие партии мелкосортной прокатной продукции возникает необходимость нагревать металл различного сортамента без остановки печи. Для таких условий работы печи трудно определить на практике переходной режим, т.е. частоту проталкивания заготовок, температуру в каждой зоне рабочего пространства, расход газа и другие параметры. В связи с этим возникает задача – разработать математическую модель переходного режима нагрева, который обеспечивал бы нагрев заготовок до заданного качества.

Анализ публикаций по теме исследований

Методические печи являются высокопроизводительными, непрерывно действующими агрегатами обеспечивающими нагрев стальных заготовок квадратного, прямоугольного или круглого сечения различных марок сталей до заданной температуры под прокатку. Тепловой работе методических нагревательных печей и расчётов нагрева металла посвящён ряд исследований [1,2,3].

В большинстве публикаций приводятся теоретические и экспериментальные исследования процесса нагрева металла [3,4] с целью определения оптимальных тепловых режимов, способствующих повышению качества нагрева. При этом, широко используются методы математического моделирования внешнего и внутреннего теплообмена в процессе нагрева металла, требующих знания теплофизических характеристик, как газовой среды, так и нагреваемых стальных заготовок различного химического состава [5]. В других публикациях рассматривается проблема окисления стальных заготовок и влияние физико-химических процессов в процессе нагрева на потери металла с окалиной [6,7]

Формулировка целей статьи

В методических нагревательных печах начальная скорость нагрева металла лимитируется величиной термических напряжений, которая определяется как составом стали, так и толщиной нагреваемого слоя заготовки. В конце нагрева температура поверхности и перепад температуры по сечению заготовки должны соответствовать требованиям технологии для данной марки стали.

Нагрев большой партии заготовок одинакового типоразмера и одной марки стали не вызывает затруднений при следовании заданной технологии. Однако, нахождение в рабочем пространстве заготовок различной толщины и химического состава, требует разработки такого переходного режима нагрева, который обеспечивал бы качество нагрева двух различ-

ных партий заготовок, близкое к технологическим требованиям для этих партий.

Цель работы: разработать математическую модель переходного режима нагрева для действующей трёхзонной методической печи мелко-сортного прокатного цеха при одновременном нахождении в печи заготовок разного сорта.

Основная часть

В методической печи заготовки в методической и сварочной зонах лежат на глиссажных трубах. Нагрев заготовок производится с двух сторон при их непрерывном расположении в печи. Для расчёта температурного поля по толщине заготовки во времени можно воспользоваться дифференциальным уравнением теплопроводности для одномерного температурного поля:

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

где $\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/м×К; $c(t)$ – теплоёмкость, Дж/кг×К; $\rho(t)$ – плотность металла, кг/м³.

В томильной зоне металл, движущийся по монолитному поду, нагревается при постоянной температуре поверхности $t_{пк}$, равной конечной температуре поверхности металла.

Для получения однозначного решения дифференциального уравнения (1) необходимо задать условия однозначности:

– начальные условия:

$$\text{при } \tau = 0 \quad t = f(x) \quad (2)$$

– граничные условия:

$$\text{при } x=0 \quad q = \alpha_{изл}^B (t_{ГВ} - t_{пв}); \quad \text{при } x=l_x \quad q = \alpha_{изл}^H (t_{ГН} - t_{пн}), \quad (3)$$

где $\alpha_{изл}^B$, $\alpha_{изл}^H$ - коэффициенты теплоотдачи излучением в верхней и нижней зонах печи, Вт/м²×К; $t_{ГВ}$, $t_{ГН}$ - температура газов в верхних и нижних зонах, °С; $t_{пв}$, $t_{пн}$ - температура поверхности металла в верхних и нижних зонах, °С.

Коэффициент теплоотдачи излучением при меняющейся температуре газов по длине печи (методическая зона) вычисляется по формуле[4]:

$$\alpha_{изл} = \frac{C_0 \sqrt{\varepsilon_{np}^H \varepsilon_{np}^K} \left[\left(\frac{T_{Г}^H}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{М}^H}{100} \right)^4 \right] \left[\left(\frac{T_{Г}^K}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{М}^K}{100} \right)^4 \right]}{\sqrt{(T_{Г}^H - T_{М}^H)(T_{Г}^K - T_{М}^K)}}, \quad (4)$$

при постоянной температуре по длине печи (сварочная зона) по формуле:

$$\alpha_{изл} = \frac{C_0 \varepsilon_{пр} \sqrt{\left[\left(\frac{T_G^H}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M^H}{100} \right)^4 \right] \left[\left(\frac{T_G^K}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M^K}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(T_G^H - T_M^H)(T_G^K - T_M^K)}}, \quad (5)$$

где C_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м²×К⁴; T_G^H , T_G^K - температура газа в начале и конце методической зоны, К; T_M^H , T_M^K - температура металла в начале и конце методической зоны, К; $\varepsilon_{пр}^H$, $\varepsilon_{пр}^K$, $\varepsilon_{пр}$ - приведенная степень черноты системы в начале и конце методической зоны и по длине сварочной зоны.

Приведённая степень черноты в системе теплообмена газовая среда – металл определялась по формуле:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\omega + 1 - \varepsilon_2}{\left[\varepsilon_M + \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_M) \right] \frac{1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_2} + \omega}, \quad (6)$$

где ε_G , ε_M - степень черноты газа и металла; ω - степень развития кладки (определялась по геометрическим размерам каждой зоны [4]).

Дифференциальное уравнение (1) с начальными (2) и граничными (3) условиями решалось конечно – разностным методом с использованием метода прогонки.

На основе разработанной программы были произведены расчеты нагрева стальных заготовок различной толщины применительно к трёх-зональной методической печи прокатного цеха ОАО «Донецксталь-МЗ» для случая одновременного нахождения в рабочем пространстве заготовок различного поперечного сечения. Предположим, что в печи нагревается заготовка толщиной S_1 , а через какое-то время в печь подаются заготовки меньшей толщины S_2 . Если нагрев осуществлять по режиму заготовки S_1 , то заготовки толщиной S_2 будут перегреваться, а при использовании режима заготовки S_2 , то заготовки толщиной S_1 будут недогреваться. Результаты моделирования нагрева заготовок толщиной 0,15; 0,18; 0,24 м при использовании для них режима нагрева исходной заготовки толщиной 0,21 м приведён на рисунке 1.

Как видно из графиков нагрева каждой заготовки, получены следующие результаты: заготовки толщиной 0,18 и 0,15 м нагрелись в методической зоне до температур 589°С и 643°С соответственно, что значительно превышает температуру пластичности для данной марки стали ($t_{пл} = 550$ °С), а заготовка толщиной 0,24 м нагрелась до температуры 520°С, что ниже $t_{пл}$. Аналогичны по характеру результаты расчёта конечной температуры нагрева по разработанной модели для исследуемых заготовок (таблица 1) показывают, что заготовки меньшего сечения нагреваются на 14÷26 граду-

сов, а температура заготовки большего сечения не достигает заданного по технологии значения.

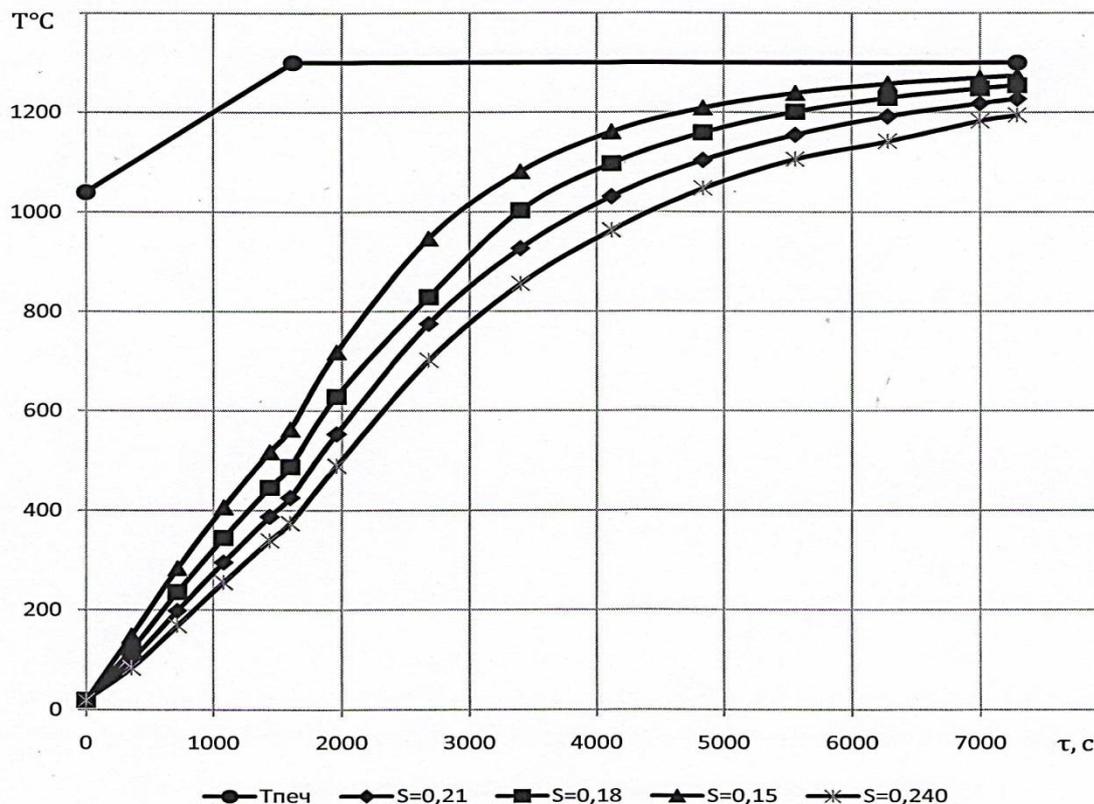


Рисунок 1 – Изменение температуры поверхности заготовки в процессе нагрева.

Таблица 1 – Изменение температуры поверхности металла при постоянном температурном режиме по длине печи и различной толщине заготовок.

Толщина заготовок, м	Температура газов по зонам печи, °C			
	методическая		сварочная	
	начало	конец	начало	конец
0,21	0	547,8	547,8	1258
0,18	0	589,7	589,7	1272
0,15	0	643	643	1284
0,24	0	516	516	1241

Как видно из приведённого выше анализа нагрева заготовок различного поперечного сечения, заготовки меньшего сечения по сравнению с исходными будут перегреваться, а большего сечения – недогреваться при условий их совместного (т.е. заготовки меньшего сечения и исходные или большего сечения и исходные) нахождения в печи и при тепловом режиме нагрева исходной заготовки.

Для таких случаев, когда на глссажных трубах находятся заготовки двух различных сечений, были рассчитаны тепловые режимы и определены температуры в сварочной зоне, в которой как показывает программа, надо изменять температуру этой зоны по ходу движения заготовок другого сечения. На рисунке 2 а, б, в показаны три позиции расположения заготовок толщиной 0,24 м и 0,21 м в разные моменты времени в сварочной зоне.

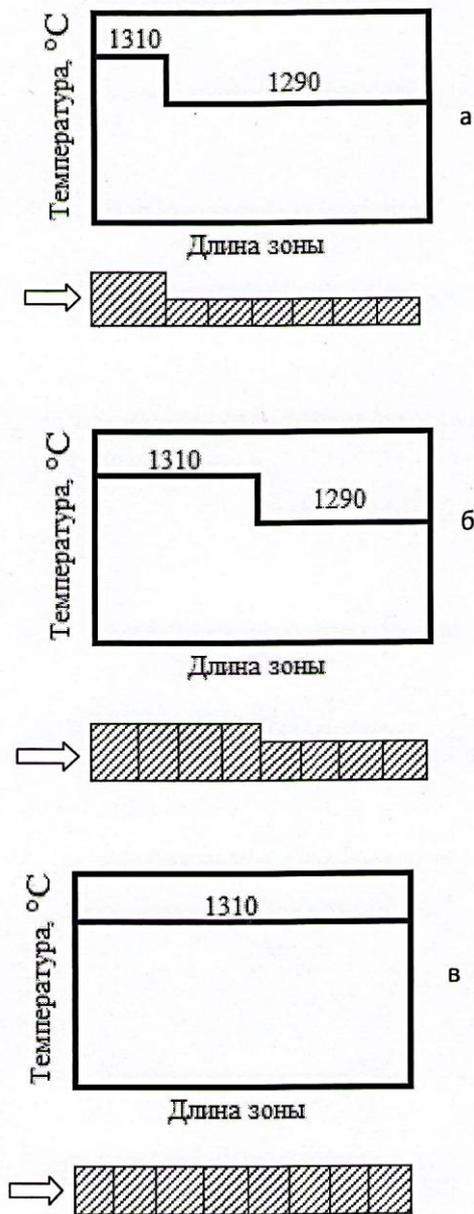


Рисунок 2 – Изменение температуры печи по длине сварочной зоны для заготовок толщиной 0,24 м и 0,21 м.

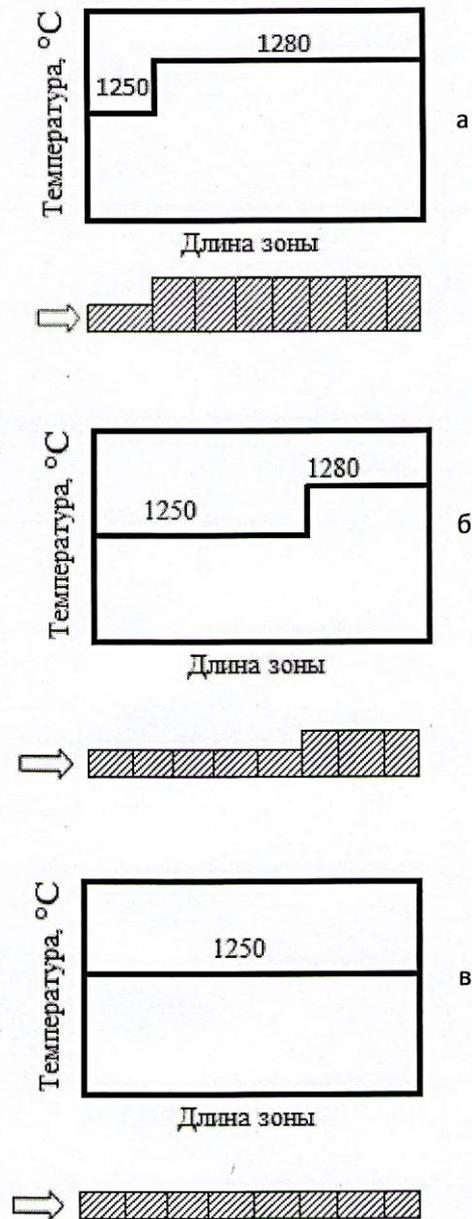


Рисунок 3 – Изменение температуры печи по длине сварочной зоны для заготовок толщиной 0,15 м и 0,21 м

На рисунке 2 «а» показан вход заготовки большего сечения (0,24м) в сварочную зону, при этом температура печи в начале зоны должна состав-

лять 1310°C. По мере продвижения этой заготовки температура, равная 1310°C, должна «следовать» за заготовкой и на выходе её установится постоянной по всей длине сварочной зоны. Такой режим, как показывает расчёт по программе, обеспечит конечную температуру нагрева заготовки толщиной 0,24 м до температуры близкой к заданной по технологии для этой марки стали.

Аналогичные расчёты были произведены для случая, когда в печи необходимо нагреть другую партию заготовок с меньшим поперечным 0,15 м сечением, чем исходные, без остановки печи, где уже находятся заготовки предыдущей партии. Результаты расчёта представлены на рисунке 3 а, б, в, где показано изменение температуры по длине сварочной зоны по мере продвижения заготовок меньшего поперечного сечения из другой партии металла.

После полного заполнения сварочной зоны этими заготовками и переход их в томильную зону, промежуточный режим заменяется на рабочий режим согласно заводской технологии для данного размера заготовки и соответствующей марки стали.

Разработанная программа нагрева стальных заготовок может быть использована для расчёта переходного режима при нагреве заготовок одинакового размера, но разных марок стали, существенно различающихся по теплофизическим характеристикам, без остановки печи.

Выводы

Выполнено математическое моделирование режимов нагрева стальных заготовок в многозонных печах для условий изменяющейся во времени и по длине температуры в сварочной зоне печи. При таком режиме работы печи одновременно нагреваются заготовки различного сортамента и с различными теплофизическими свойствами. Разработанные на основе математического моделирования алгоритмы позволяют легче осуществить переход с одного режима нагрева на другой, что позволяет получить заданное качество нагрева и тем самым уменьшить неблагоприятное влияние на нагрев особенностей переходного режима.

Эффективность практического применения переходных тепловых режимов может быть повышена при установке на печи (полностью или частично) плоско-пламенных горелок, а математическая модель будет составной частью АСУ методической печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко. – К.: Наукова думка, 2008. – 243 с.
2. Применение ЭВМ для расчета нагрева металла в методической печи / Е.И. Казанцев, С.И. Гинкул, В.В. Антонов, Н.В. Гончаров // Сталь. – 1973. – №1. – С. 77-79.

3. Исследование температурного режима нагревательных печей прокатных станов при изменении сортамента нагреваемого металла / С.И. Гинкул, А.Н. Лебедев, Ю.В. Подобед, Ю.М. Сапронова // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Металлургия». – 2010. – Вып. 12(177). – С. 201 – 206.
4. Мاستрюков Б.С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей / Б.С. Мастрюков. – М.: Металлургия, 1986. – Т.2. – 376 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. – 296 с.
6. Казанцев Е.И. Промышленные печи / Е.И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
7. Казанцев Е.И. Выбор оптимального температурного режима по минимуму окисления / Е.И. Казанцев, Г.П. Вынов, С.И. Гинкул // Изв. вузов Черная металлургия. – 1977. – №9. – С. 165-168.

Надійшла до редакції 12.04.2012

Рецензент д-р техн. наук, проф. Є.М. Смирнов

С.І. Гінкул, А.І. Туяхов, Ю.С. Сибірцева
Донецький національний технічний університет, Донецьк

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ НАГРІВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ПРОКАТНИХ СТАНІВ ПРИ ОДНОЧАСНОМУ НАГРІВАННІ МЕТАЛА РІЗНОГО СОРТАМЕНТУ

Запропонована математична модель нагрівання заготовок квадратного або прямокутного перерізу в методичній нагрівальній печі в перехідному режимі, коли в печі одночасно нагріваються дві партії заготовок різного поперечного перетину, які рухаються одна за другою. Математичне моделювання дає можливість визначати температурний режим по довжині печі, який забезпечує отримання значень параметрів, які відповідають прийнятій технології нагрівання для двох партій заготовок і які відрізняються як по поперечному перерізу, так і по складу.

Ключові слова: методична піч, заготовка, температура, моделювання, прогонка, диференціальне рівняння, теплопровідність.

S.I. Ginkul, A.I. Tuyakhov, Y.S. Sibirtseva
Donetsk National Technical University, Donetsk

MATHEMATICAL MODELING OF ROLLING MILLS HEATING FURNACES TEMPERATURE MODE DURING SIMULTANEOUS HEATING OF METAL OF VARIOUS ASSORTMENT

We propose a mathematical model of heating billets with square and rectangular sections in a heating methodical furnace in the transient mode, when two sets of billets with different cross sections are simultaneously heated; the billets are moving one after another. Mathematical modeling helps us to define the temperature mode along the length of the furnace that provides parameters values, which correspond to current techniques of heating billets with different sections

Keywords: methodical furnace, billet, temperature, modelling, differential equation, heat conductivity.