



The analysis of the tube shells heating technology in annular furnaces is carried out, the main technological factors, exerting the most influence on energotechnological indices of the process and quality of heating, are determined.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Президиум НАН Беларуси,
М. Л. ГЕРМАН, РУП «БелТЭИ» Министерства энергетики,
С. М. КАБИШОВ, С. В. КОРНЕЕВ, БНТУ

УДК 669.041.001.24

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ НАГРЕВА ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК В КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ

Введение. В технологии производства бесшовных труб нагрев заготовок перед прошивкой считается одной из основных технологических операций, поскольку именно условия и качество нагрева металла в значительной степени определяют точность геометрических размеров и механические свойства готовых труб, производительность установки, энергосиловые и скоростные показатели процесса прокатки, себестоимость и конкурентоспособность готовой продукции.

В трубном производстве наибольшее распространение получили газовые печи с кольцевым вращающимся подом (рис. 1), так как они обладают большой технологической гибкостью, приспособлены для перехода с камерного режима работы на методический и, наоборот, проще в эксплуатации и требуют меньше обслуживающего персонала по сравнению с другими агрегатами, на которых может выполняться данная технологическая операция [1–3]. В этих печах заготовки, лежащие неподвижно на вращающемся поду, вместе с подом проходят методическую, сварочную и томильную зоны. Таким образом, заготовка за время полного оборота пода нагревается до необходимой температуры. Загрузка и выгрузка заготовок осуществляются специальными машинами. Кольцевой под печи движется толчками, поворачиваясь при каждом толчке на угол, соответствующий расстоянию между двумя соседними заготовками. Скорость вращения пода

может изменяться в зависимости от размера нагреваемой заготовки.

Кольцевые печи могут работать как на газообразном, так и на жидком топливе. Конструкция печей данного типа позволяет распределять подачу топлива в соответствии с требованиями температурного режима, оперативно изменять температуру в отапливаемых зонах при уменьшении или росте производительности и нагреве заготовок различного размерного и марочного сортамента. Горелки устанавливаются как на наружных, так и на внутренних стенах печи. Все шире

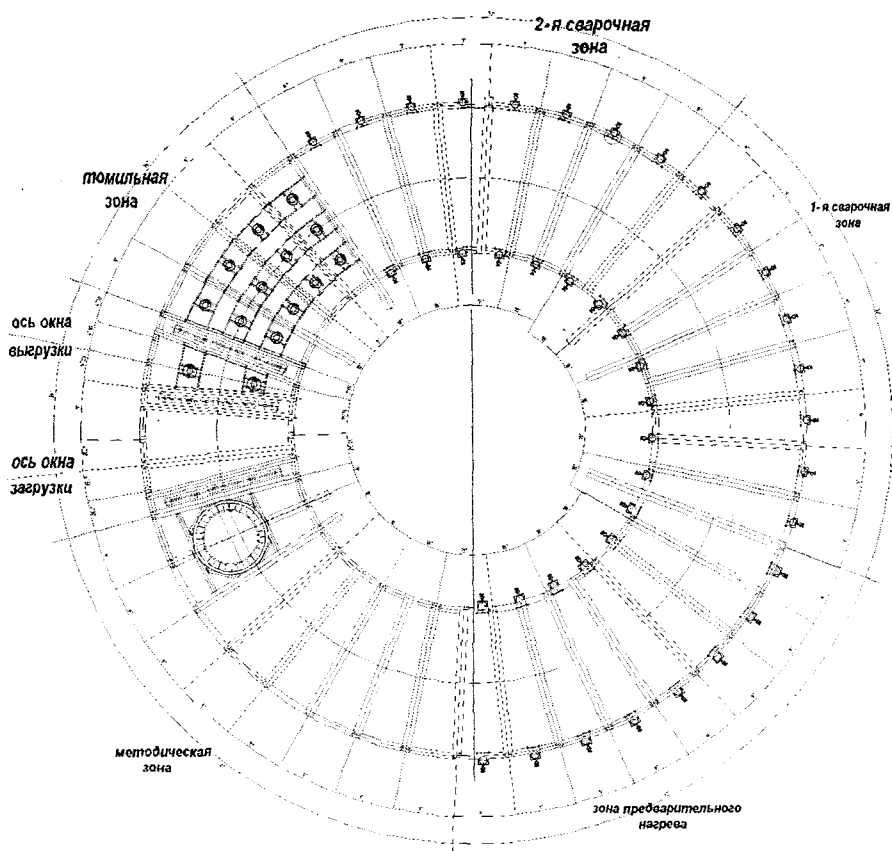


Рис. 1. Схема кольцевой печи для нагрева трубных заготовок РУП «БМЗ»

применяется сводовое отопление печей с кольцевым подом.

Объект исследования — *кольцевая печь трубопрокатного агрегата РУП «БМЗ»*. При строительстве кольцевой печи для нагрева цилиндрических заготовок перед прошивкой трубопрокатного цеха РУП «БМЗ» были реализованы новейшие технические решения в области печестроения. В печи организовано комбинированное отопление: в зонах предварительного нагрева и сварочных — с помощью боковых длиннофакельных горелок, а в томильной зоне установлены сводовые плоскопламенные газогорелочные устройства. Это позволит получить на выходе из печи более равномерное температурное поле в нагреваемых заготовках. Данное техническое решение было предложено специалистами НАН Беларуси, РУП «БМЗ» и БНТУ еще до начала строительства трубопрокатного агрегата и в настоящее время на него получены патенты РБ [4, 5].

С целью повышения эффективности топливоспользования новая печь оборудована рекуператором, обеспечивающим температуру подогрева воздуха до 450 °С. Высокое теплосодержание воздуха, подаваемого на горение, позволит в случае необходимости организовать интенсивный нагрев заготовок, так как при таких условиях калориметрическая температура горения природного газа достигает 2275 °С, а, следовательно, действительная температура факела будет находиться на уровне 1500–1550 °С.

Кольцевая нагревательная печь трубопрокатного цеха РУП «БМЗ» (рис. 1) имеет следующие основные характеристики:

- производительность при холодном посаде — до 80 т/ч;
- диаметр нагреваемых заготовок — до 0,2 м, длина — до 4,0 м;
- число отапливаемых зон — 5;
- общая длина печи по оси пода — 65,94 м;
- длина неотапливаемого участка методической зоны — 13,19 м;
- длина подогреваемого участка методической зоны — 13,19 м;
- длина первой и второй сварочных зон — по 13,19 м;
- длина томильной зоны — 6,6 м;
- ширина пода — 4,3 м;
- высота рабочего пространства — 1,8 м;
- число горелок в методической зоне — 14; в первой и второй сварочных зонах — по 14; в томильной зоне — 12 сводовых + 2 сводовых над окном выдачи;
- температура подогрева воздуха в рекуператоре — до 450 °С;
- угол между осями окон загрузки и выгрузки — 36°.

Несмотря на то что технология нагрева трубных заготовок в кольцевых печах с вращающимся

подом изучена достаточно подробно, о чем свидетельствуют публикации в технической литературе, есть ряд вопросов, которые требуют проведения дополнительных исследований.

Методы решения поставленных задач. В связи с тем что в кольцевых печах площадь пода не полностью занята металлом, кладка пода играет достаточно активную роль в теплообмене излучением и способствует более равномерному нагреву металла. Заготовки укладываются с зазорами и свободные участки подины излучают и отражают поток излучения, который частично попадает на нижнюю поверхность заготовок и способствует их более равномерному нагреву.

Как известно, коэффициент несимметричности нагрева $\mu = q_1 / (q_1 + q_2)$, где $q_1 + q_2$ — тепловые потоки сверху и снизу. Симметричный нагрев имеет место при $\mu = 0,5$. Установлено, что в печах с кольцевым подом при нагреве трубной заготовки $\mu = 0,55 - 0,58$. Это показывает, что хотя нагрев заготовки и не является полностью симметричным, трубные заготовки получают снизу от кладки достаточно большое количество тепла. Необходимо отметить, что кладка подины особенно интенсивно излучает теплоту на заготовки сразу после их загрузки, когда кладка сама только вышла из высокотемпературной зоны, а заготовки холодные. В начале зоны подогрева кладка остывает, а затем по мере прогрева заготовки ее температура начинает повышаться. Кроме излучения, тепло от подины к заготовкам передается и теплопроводностью [1].

Величина смещения теплового центра заготовки относительно геометрического и температурный градиент по сечению на выдаче существенно зависят от производительности печи, шага раскладки и диаметра заготовок. Первые два параметра определяют скорость перемещения металла в рабочем пространстве печи.

Очевидно, что в реальных условиях нагрева металла в методической печи, чем быстрее движется заготовка, тем большее значение температурного перепада по сечению достигается в процессе нагрева. В то же время из литературы известно, что температурный перепад по сечению заготовки на выдаче из печи с ростом межосевого расстояния снижается. Например, с увеличением шага раскладки (S/D) от 2 до 3 коэффициент несимметричности нагрева μ уменьшался с 0,7–0,73 до 0,63–0,65 [6]. Но, как показали исследования [1], при этом снижается производительность печи. Следует отметить, что в теории нагрева до настоящего времени не существует общепринятой методики выбора шага раскладки заготовок на подине кольцевой печи.

Так как в условиях действующего производства кольцевая печь должна обеспечивать конкретную производительность и требуемое качество нагрева в зависимости от профиля проката, то

актуальной является задача определения оптимального шага раскладки при фиксированной производительности.

Таким образом, при решении поставленной задачи следует учитывать изменение условий теплообмена на поверхности заготовок в процессе нагрева, их взаимное расположение, геометрию рабочего пространства печи, изменение теплофизических свойств металла в зависимости от температуры, нестационарное тепловое состояние вращающегося пода и др. Указанным требованиям удовлетворяет математическая модель сопряженного теплообмена, основные положения которой изложены в работах [7, 8].

Процесс теплообмена в рабочем пространстве кольцевой печи между дымовыми газами и теплопринимающими поверхностями (футеровка и металл) описывается уравнением переноса энергии, которое в нестационарном случае имеет вид [9]:

$$c_p^g \rho_g \frac{\partial T_g(\vec{r})}{\partial \tau} + \text{div}(c_p^g \rho_g \vec{\partial} T_g(\vec{r}) - \lambda_g \text{grad} T_g(\vec{r})) = q_c(\vec{r}) - \text{div} \vec{q}_r(\vec{r}). \quad (1)$$

Здесь τ – время; ρ_g , c_p^g и λ_g – соответственно плотность, кг/м³, теплоемкость, Дж/(кг·К), и эффективный (с учетом турбулентных пульсаций) коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) печной среды – дымовых газов. Все коэффициенты уравнения (1) зависят от координаты \vec{r} и температуры T_g .

Тепловой режим ограждающих конструкций описывается уравнением

$$q_w = \frac{T_w - T_w^H}{R} = \alpha_n (T_w^H - T_o) + \varepsilon_n \sigma_0 ((T_w^H)^4 - T_o^4), \quad (2)$$

где q_w – полный поток, падающий на стенку в произвольной точке с внутренней стороны; T_w , T_w^H , T_o – соответственно температура на внутренней и внешней поверхностях стены и температура окружающей среды; $\alpha_n \approx 1,83(T_w^H - T_o)$ – коэффициент теплоотдачи; ε_n – степень черноты наружной поверхности стенок печи.

Внутренняя задача расчета нестационарных температурных полей в нагреваемом цилиндре и подвижных элементах печи (например, под в кольцевой печи) включает уравнение теплопроводности [9]

$$c_p^m(T_m) \rho_m(T_m) \frac{\partial T_m(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} = \nabla(\lambda_m(T_m) \nabla T_m(\vec{r}, \tau)), \quad (3)$$

где $\vec{r} = (r, \varphi, z)$ – текущая координата точки (в двумерном уравнении $\vec{r} = (r, \varphi)$).

Начальное условие, представляющее собой распределение температуры в теле в начальный момент времени:

$$T_{\text{мет}}(\vec{r}, 0) = T_{\text{мет}0} = \text{const}. \quad (4)$$

Граничные условия, учитывающие конвективный и радиационный механизмы теплоотдачи на поверхности рассматриваемого цилиндра [10]:

$$q_s(\vec{r}, \tau) = -\lambda_m(T) \left. \frac{\partial T_m(\vec{r}, \tau)}{\partial \vec{r}} \right|_{\vec{r} \in B} = \alpha_g (T_g - T_m(\vec{r}, \tau)) + q_{\text{res}}(\vec{r}), \quad (5)$$

где \vec{n} – внешняя нормаль к границе цилиндра B ; T_g – температура печной среды, контактирующей с рассматриваемым телом; α_g – коэффициент теплообмена тела с печной средой [6]; $q_{\text{res}}(\vec{r})$ – плотность результирующего радиационного потока на поверхность тела.

Высокая точность данной модели подтверждена результатами исследований тепловой работы современных нагревательных печей с механизированным подом [7, 8].

Для проверки математической модели и подтверждения ее адекватности при исследованиях тепловой работы кольцевой печи с вращающимся подом был произведен расчет нагрева заготовок из стали 40 диаметром 270 мм, длиной 1,75 м и выполнено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными [1]. Расстояние между осями заготовок принимали $S/D=1,5$, укладка однорядная в шахматном порядке.

Изменения максимальной и минимальной температур в сечении заготовки в процессе нагрева показаны на рис. 2. В табл. 1 приведен тепловой

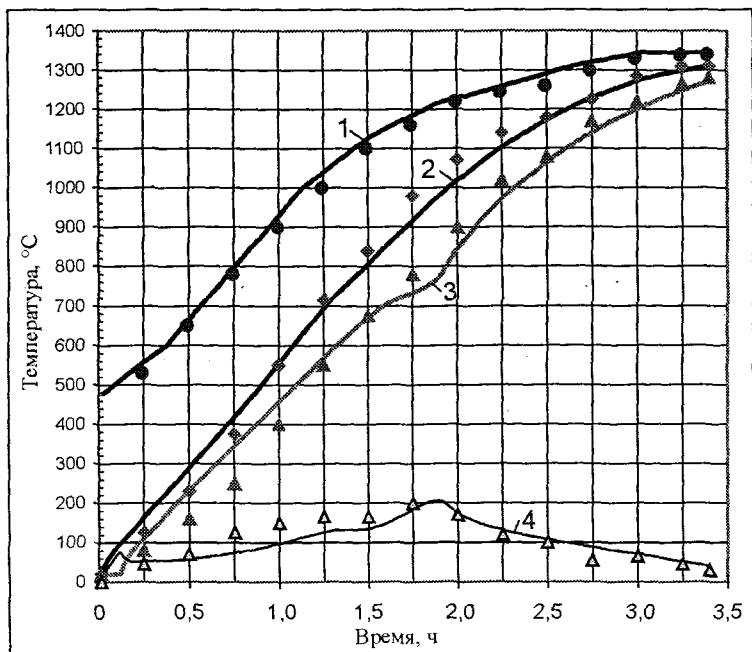


Рис. 2. Результаты сопоставительного расчета нагрева заготовок диаметром 0,27 м из стали 40 в кольцевой печи: 1 – температура печи; 2, 3 – температура поверхности и центра заготовки; 4 – перепад температуры по сечению заготовки

баланс печи при нагреве заготовок из стали 40 диаметром 270 мм в кольцевой печи Днепровского металлургического комбината им. Ф.Э. Дзержинского.

Сравнение экспериментальных и расчетных значений (рис. 3, табл. 1), показало, что их расхождение не превышает 4%, что доказывает точность и адекватность используемой математической модели.

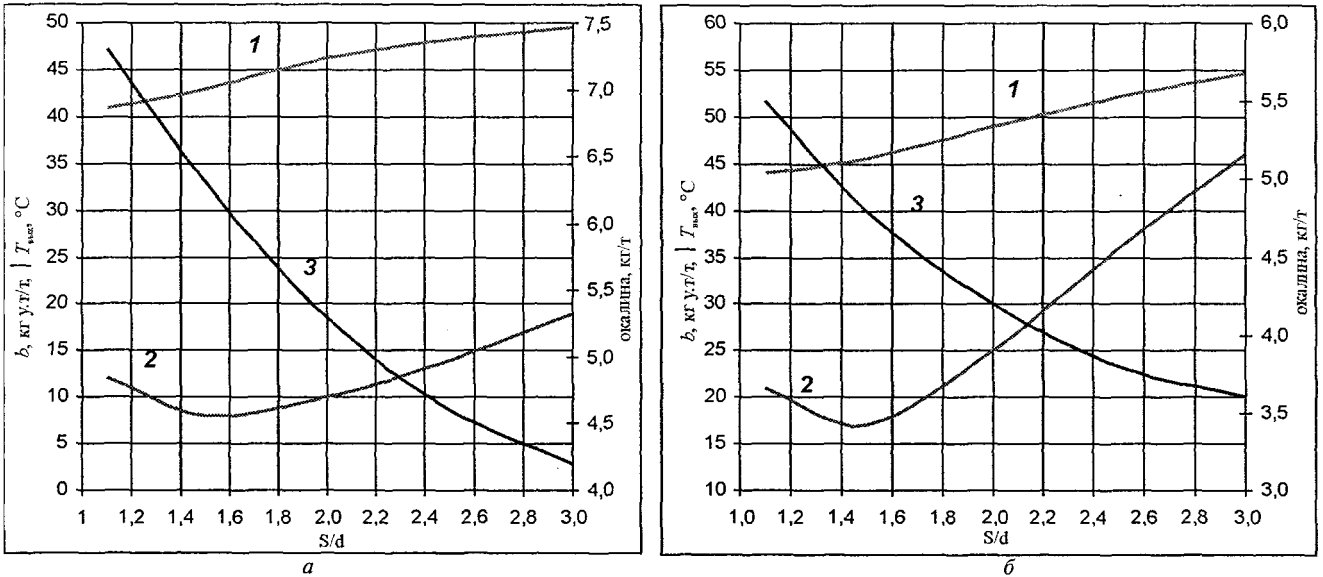


Рис. 3. Результаты расчетов для случая нагрева заготовок диаметром 100 мм из стали 45 с производительностью 40 т/ч (а); 60 т/ч (б); 1 – удельный расход условного топлива, кг у.т./т; 2 – температурный перепад по сечению заготовки на выходе из печи, °С; 3 – угар металла, кг/т

Таблица 1. Тепловой баланс кольцевой печи ОАО «ДМК» при нагреве трубных заготовок из стали 40 диаметром 270 мм

Расход топлива 1059,98 м ³ /ч, производительность печи 25,90 т/ч, Ст40					
Приход тепла			Расход тепла		
	МВт	%		МВт	%
1. Химическое тепло топлива	9,846	88,60	1. Тепло, затраченное на нагрев металла	6,250	56,24
2. Тепло, вносимое подогретым воздухом	0,860	7,74	2. Потери физического тепла с продуктами горения, уходящими из рабочего пространства печи	1,813	16,32
3. Тепло, вносимое подогретым топливом	0,000	0,00	3. Потери тепла от химической неполноты горения топлива	0,166	1,49
4. Количество тепла, выделяемого при окислении Fe	0,406	3,66	4. Потери тепла через кладку	0,826	7,43
			5. Потери тепла с охлаждающей водой и паром	0,933	8,40
			6. Потери тепла с окалиной	0,255	2,29
			7. Потери через окна	0,263	2,36
			8. Неучтенные потери	0,607	5,46
ВСЕГО	11,112	100,00	ВСЕГО	11,112	100,00

Удельный расход условного топлива $b = 46,67$ кг у. т. /т, КПД = 0,562441, КИТ=0,91

Разработанная математическая модель использована для теоретического изучения тепловой работы кольцевой печи РУП «БМЗ» на стадии строительства, а также для выдачи рекомендаций по оптимизации тепловой работы агрегата в зависимости от типоразмеров заготовок, марки стали, производительности и т.д.

Проведение численных экспериментов и анализ полученных результатов. Целью расчетов является определение оптимального шага раскладки заготовок с точки зрения трех критериев: топливопотребления, окалинообразования и качества нагрева.

При проведении расчетов варьировали производительностью печи (40, 60 т/ч), диаметром заготовок (100 и 200 мм) и шагом раскладки заготовок на поду печи. Следует отметить, что для обеспечения корректности сравнения и анализа полученных результатов в процессе исследований моделировали нагрев металла в двухзонной печи, где первая зона – безгорелочная, вторая – отапливаемая (с постоянной температурой). При нагреве заготовок одного диаметра с постоянной производительностью, но при различном шаге раскладки температура в отапливаемой зоне подбиралась

таким образом, чтобы обеспечить в момент выдачи заданную температуру на поверхности заготовки.

Для удобства сравнения полученные результаты приведены в табличной форме (табл. 2). Помимо расхода топлива и величины угара металла, в таблице даны значения конечной температуры нагрева и температурного перепада по

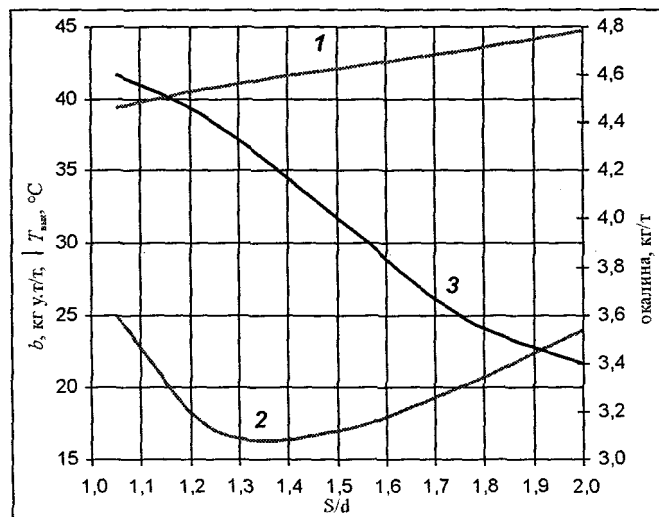
сечению заготовки между точками с максимальной и минимальной температурами. Данные параметры важны, так как оказывают существенное влияние на термонапряженное состояние металла в процессе нагрева и, как следствие, на процесс последующей прошивки трубной заготовки.

Таблица 2. Результаты расчета нагрева заготовок в кольцевой печи

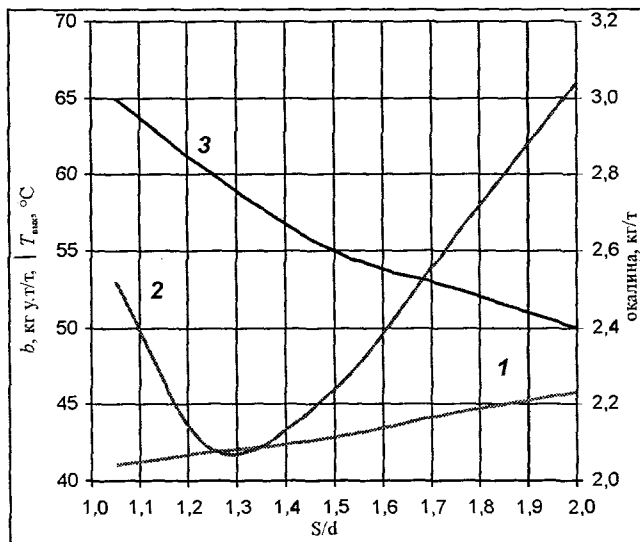
Диаметр заготовки, мм	Производительность, т/ч	Шаг раскладки, мм	Удельный расход условного топлива, кг/т	Угар металла, кг/т	Температурный перепад по сечению заготовки на выдаче, $\Delta T_{\text{вых}}$, °C	$\Delta T_{\text{пых}}$ при нагреве, °C	Температура нагрева, °C
200	40	10	39,35451	4,6	25	261	1176
		50	40,76779	4,4	17	246	1177
		100	42,07236	4	17	246	1177
		150	43,33345	3,6	20	252	1176
		200	44,70324	3,4	24	259	1177
	60	10	41,02871	3	53	272	1145
		50	41,87668	2,8	42	255	1146
		100	42,83336	2,6	46	259	1145
		150	44,46407	2,5	56	271	1148
		200	45,79039	2,4	66	282	1146
100	40	10	40,91999	7,3	12	159	1197
		50	42,96382	6,3	8	151	1197
		100	46,29047	5,3	10	160	1197
		150	48,29081	4,6	14	173	1197
		200	49,53015	4,2	19	188	1196
	60	10	43,94225	5,5	21	178	1202
		50	45,63819	4,8	17	169	1204
		100	49,00832	4,2	25	185	1201
		150	52,18278	3,8	36	211	1201
		200	54,63971	3,6	46	231	1202

С целью визуальной оценки оптимальности того или иного шага раскладки с точки зрения рассматриваемых критериев топливопотребления, угара ме-

талла и качества нагрева (температурного перепада на выдаче из печи) расчетные данные, приведенные в табл. 1, представлены в виде графиков на рис. 3, 4.



а



б

Рис. 4. Результаты расчетов для случая нагрева заготовок диаметром 200 мм из стали 45 с производительностью 40 т/ч (а); 60 т/ч (б); 1 — удельный расход условного топлива, кг у.т./т; 2 — температурный перепад по сечению заготовки на выходе из печи, °C; 3 — угар металла, кг/т

Качественный анализ полученных результатов показывает, что с увеличением шага раскладки уменьшается величина угара металла. С увеличением производительности указанная тенденция сохраняется, но увеличение расстояния между заготовками приводит к существенному росту температурного градиента во время процесса нагрева. Расход топлива с увеличением шага раскладки монотонно возрастает.

Кривая температурного перепада на рисунках имеет ярко выраженный оптимум. Например, при нагреве заготовок диаметром 100 мм с производительностью 40 т/ч минимальное значение $\Delta T_{\text{вых}}$ достигается при $S/D=1,55$. С ростом производительности до 60 т/ч оптимум смещается несколько левее и находится на уровне $S/D=1,45$. Аналогичная тенденция наблюдается при нагреве заготовок диаметром 200 мм. Но в данном случае минимальный температурный перепад при производительности 40 т/ч наблюдается в окрестностях точки $S/D=1,35$, а с увеличением скорости нагрева при производительности 60 т/ч — уменьшается до $S/D=1,3$.

Следовательно, с увеличением производительности и диаметра нагреваемых заготовок оптимальный шаг раскладки с точки зрения температурного перепада по сечению в процессе нагрева и на выдаче из печи уменьшается.

Принимая во внимание противоположный характер кривых расхода топлива и угара металла в зависимости от шага раскладки, оптимум с точки зрения расхода топлива и окалинообразования может быть определен в каждом конкретном случае с учетом соотношения цен на природный газ и металл.

Таким образом, разработанная математическая модель нагрева цилиндрических заготовок в кольцевой печи позволяет определить оптимальный шаг раскладки заготовок для различных значений производительности с точки зрения трех критериев, определяющих качество нагрева и энерготехнологические характеристики нагревательного устройства. Указанные результаты получены впервые и не имеют аналогов в технической литературе.

Выводы

1. В процессе проведения исследований выполнен анализ технологии нагрева трубных заготовок в кольцевых печах, определены основные технологические факторы, оказывающие наибольшее влияние на энерготехнологические показатели процесса и качество нагрева.

2. Разработана математическая модель сопряженного теплообмена в рабочем пространстве кольцевой печи с вращающимся подом, учитывающая нелинейность теплофизических свойств металла и футеровочных материалов от температуры, селективность излучения, а также нестационарное тепловое состояние пода.

3. Выполнена серия численных экспериментов, анализ которых позволил установить качественные зависимости удельного расхода топлива, угара металла и температурного перепада по сечению заготовки в процессе нагрева и на выдаче из печи от шага раскладки заготовок на подине.

4. При выполнении данной работы получены новые результаты, расширяющие область знаний о процессах нагрева металла в кольцевых печах. В отличие от исследований Н.Ю. Тайца, М.К. Клейнера, ученых ВНИТИ и др. [11–16], где утверждается, что с ростом шага раскладки равномерность нагрева улучшается, результаты, представленные в данной работе, показывают, что при постоянной производительности печи такая тенденция наблюдается лишь до некоторого предела, после превышения которого температурный градиент вновь начинает расти. Кроме того, с увеличением шага раскладки при фиксированной производительности нагревательного устройства монотонно возрастает удельный расход топлива и уменьшаются потери металла с окалиной. Таким образом, оптимальный шаг раскладки с точки зрения качества нагрева и минимизации материальных затрат может быть определен в каждом конкретном случае с учетом соотношения цен на природный газ и металл.

Литература

1. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Пекарский М.Я. Кольцевые печи: Теория и расчеты / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского. Мн.: Выш. шк., 1993.
2. Тимошпольский В.И., Самойлович Ю.А. Теоретические основы тепловой обработки стали в трубопрокатном производстве. Мн.: Белорусская наука, 2005.
3. Кривандин В.А., Егоров А.В. Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии. М.: Металлургия, 1989.
4. Пат. РБ № 2017. Кольцевая печь для производства горячедеформированных бесшовных труб.
5. Пат. РБ № 2016. Кольцевая печь с механизированным подом для заготовок бесшовных труб.
6. Григорьев В.Н. Кольцевые печи для нагрева металла. М.: Металлургиздат, 1958.
7. Математическое моделирование сопряженного теплообмена в нагревательных печах с подвижным подом / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман, П.С. Гринчук, С.М. Кабишов // Инж.-физ. журн. 2006. Т.79. № 3. С. 3–11.
8. Разработка математической модели нагрева заготовок различной конфигурации в пламенных печах / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман, И.А. Трусова, С.М. Кабишов // Тр. III Междунар. науч.-практ. конф. «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее» М.: МИСиС, 2006. С. 576–579.
9. Kissel R. // Heurtey bul. inform. 1978. N69. P. 15–20.
10. Адзериho К.С., Ноготов Е.Ф., Трофимов В.П. Радиационный теплообмен в двухфазных средах. Мн.: Наука и техника, 1987.
11. Тайц Н.Ю. Нагрев металла в трубном производстве // Сталь. 1966. №7. С.661–665.
12. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургиздат, 1962.
13. Тайц Н.Ю., Пекарский М.Я., Сабельников А.Г. Исследование нагрева трубных заготовок в кольцевых печах // Сталь. 1969. № 9. С. 86–88.
14. Ситковский И.С., Клейнер М.К., Эммануэль Г.А. Нагрев круглых слитков в кольцевых печах // Сталь. 1971. №3. С. 272–276.
15. Клейнер М.К., Эммануэль Г.А. Исследование нагрева круглых заготовок с помощью водоохлаждаемых секционных калориметров // Изв. вузов. Черная металлургия. 1971. № 12. С. 135–138.
16. Клейнер М.К., Эммануэль Г.А. О методике экспериментального исследования несимметричного нагрева круглых заготовок // Изв. вузов. Черная металлургия. 1968. № 12. С. 163–168.