

УДК 621.783

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, Д. Н. АНДРИАНОВ,
С. М. КОЗЛОВ, П. Э. РАТНИКОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК В КОЛЬЦЕВЫХ ПЕЧАХ

*Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси,
Белорусский национальный технический университет*

(Поступила в редакцию 13.04.2004)

В технологии производства горячедеформированных бесшовных труб нагрев заготовок перед последующей прошивкой является одним из основополагающих технологических процессов, предопределяющим в значительной степени механические и технологические свойства готовых труб, производительность трубопрокатного агрегата, энергосиловые и скоростные показатели процесса прокатки.

В современных трубопрокатных агрегатах для нагрева заготовок применяют газовые (кольцевые, карусельные, секционные, с шагающими балками) и индукционные печи. Газовые кольцевые печи с вращающимся подом обладают по сравнению с другими рядом неоспоримых преимуществ, что и предопределило их наибольшее распространение в трубном производстве: возможность достижения высокого качества нагрева, сравнительно невысокий удельный расход топлива (менее 60 кг у. т/т), низкий угар металла (до 0,5%), компактность и др. Кроме того, кольцевые печные агрегаты имеют возможность полной автоматизации нагрева заготовок и контроля технологических процессов, благодаря чему возможно управление качеством нагрева металла и равномерностью температурного поля по сечению заготовки [1, 2]. Значительное преимущество кольцевые печи имеют при производстве высококачественных сталей и сплавов, позволяя в широком диапазоне варьировать температурные параметры в зависимости от технологических требований, а также формировать садку из малотоннажных плавков и партий металла с различными физико-химическими свойствами.

Для трубопрокатных станов с очень широким марочным составом металла и различными геометрическими размерами нагреваемых заготовок необходимы печные агрегаты, обладающие большой тепло-технической гибкостью, приспособленные для перехода с камерного режима работы на методический и наоборот. Печи с кольцевым подом являются именно таким агрегатом, так как, имея горелки, равномерно расположенные по их окружности, они позволяют распределять подачу топлива в соответствии с требованиями температурного режима: при камерном — равномерно по всей окружности, при методическом — неравномерно.

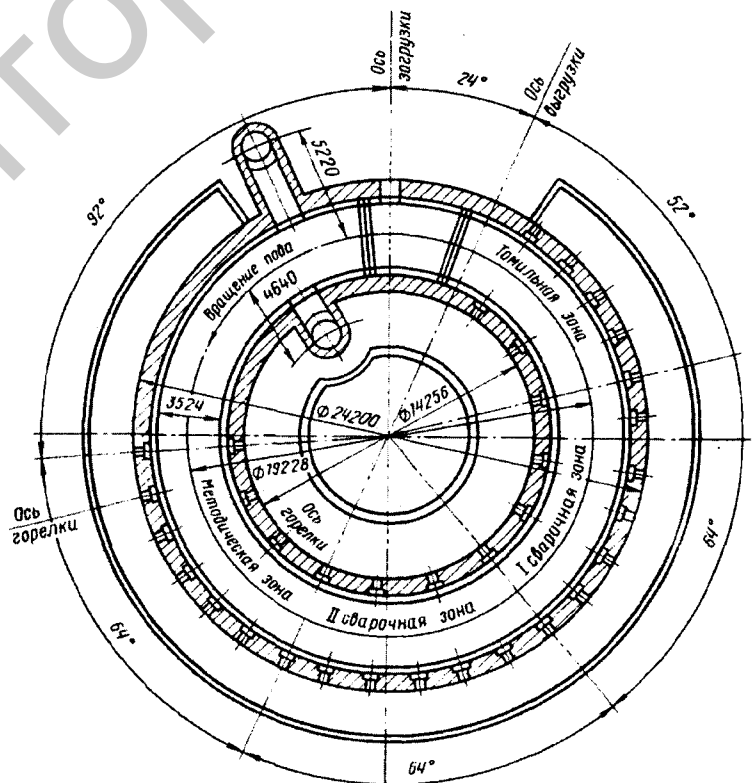


Рис. 1. Схема кольцевой печи для нагрева трубных заготовок

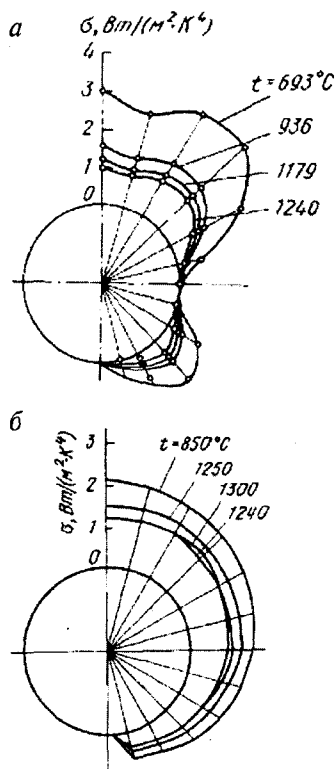


Рис. 2. Зависимость приведенного коэффициента излучения по поверхности заготовки от температуры и шага раскладки: а — $S/d = 1,0$; б — $S/d = \infty$

Математическая формулировка задачи

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi} \frac{\partial T}{\partial \varphi}, \quad (1)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(R, \varphi, \tau)}{\partial r} = \sigma(\varphi, T_{\text{печ}}(\tau)) (T_{\text{печ}}^4(\tau) - T^4(R, \varphi, \tau)) + \alpha (T_{\text{печ}}(\tau) - T(R, \varphi, \tau)), \quad (2)$$

$$T(r, \varphi, 0) = T_0(r, \varphi). \quad (3)$$

Учет несимметричности нагрева заготовок по периметру осуществляется путем задания коэффициента внешнего теплообмена как функции угловой координаты сечения заготовки и взаимного расположения заготовок (рис. 2):

$$\sigma(\varphi, T_{\text{печ}}(\tau)) = \sigma_{\text{max}}(T_{\text{печ}}(\tau)) \sum_{i=0}^6 n_i \cos i\varphi. \quad (4)$$

С целью учета влияния деформированной подины на распределение температурного поля по сечению цилиндра математическая модель дополняется граничными условиями IV рода для нижней поверхности цилиндра:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\Gamma} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T_{\text{под}}}{\partial x} \right|_{\Gamma}, \quad (5)$$

где $T_{\text{под}}$ — температура пода; λ_1, λ_2 — теплопроводность цилиндра и пода соответственно, остальные обозначения общепринятые в задачах теплопроводности.

Следует также отметить, что при проведении расчетов представляется возможным учесть месторасположение горелочных устройств, тепловое сопротивление слоя окалины, растущей

Схема кольцевой печи приведена на рис. 1. Печной агрегат данной конструкции имеет следующие основные характеристики [1]: производительность 40 т/ч; диаметр нагреваемых заготовок до 0,3 м; общая длина по кладке 56,6 м; температура подогрева воздуха в рекуператоре до 450 °С. В качестве основного топлива используется природный газ. Угол между окнами загрузки и выгрузки 24°. Кольцевые зазоры между вращающимся подом и неподвижными стенками рабочей камеры печи перекрыты песочными затворами. Печь имеет плоский подвесной свод, собранный из подвесных кирпичей с ребристыми гранями. Под печи опирается на 72 стационарных ролика, размещенных по трем концентрическим окружностям, центр которых совпадает с осью вращения подины. Фиксация вращающегося пода осуществляется двадцатью четырьмя упорными роликами. Под приводится во вращение двумя приводами, расположенными с диаметрально противоположных сторон печи. Суммарная мощность приводов 74 кВт, частота вращения 970 об/мин. В целях утилизации тепла дымовых газов за печью на общем борове установлен трехоборотный (по ходу воздуха) рекуператор, состоящий из двух параллельно включенных горизонтальных групп металлических игольчатых труб. За первым рекуператором устанавливают второй трубчатый металлический рекуператор для подогрева газа.

Для построения математической модели нагрева цилиндрических слитков и заготовок, расположенных на подине с зазором, необходимо учитывать несимметричность нагрева, особенности теплообмена на поверхности нагреваемого тела, конструктивные параметры агрегата. При этом в зависимости от конечной цели исследований модель учитывает либо деформированную подину кольцевой печи (следует отметить, что порядка 70% всего времени эксплуатации печь работает с деформированной подиной), либо моделирует нагрев цилиндрических заготовок на гладкой подине [1, 3—5].

на поверхности заготовки, непостоянство условий теплообмена на поверхности цилиндра. Для удобства выполнения теплотехнических расчетов кольцевая печь представлена развернутым каналом постоянного сечения и разбита на расчетные элементарные зоны.

Разработанная математическая модель нагрева цилиндрических заготовок должна быть увязана с тепловыми балансами печи. Кольцевая печь относится к многозонным нагревательным устройствам, поэтому данную операцию необходимо выполнять для каждой зоны отдельно, сопрягая тепловые балансы на границах зон.

Уравнение теплового баланса элементарного расчетного объема имеет вид

$$\left(B_i (Q_H^p + Q_\phi) + \sum_{k=i+1}^{N=35} B_k V_{\alpha, i+1} c T_{i+1} \right) \Delta\tau + Q_{\text{Экз}} = \left(\sum_{k=1}^{T=35} B_k V_{\alpha, i} c T_i \right) \Delta\tau + Q_{\text{Кл}i} + Q_{\text{М}i}, \quad (6)$$

где B_i — расход топлива, $\text{м}^3/\text{ч}$; Q_H^p — низшая теплотворная способность топлива, $\text{кДж}/\text{м}^3$; Q_ϕ — физическое тепло, внесенное единицей объема воздуха, $\text{кДж}/\text{м}^3$; B_k — расход топлива в текущей зоне, $\text{м}^3/\text{ч}$; $Q_{\text{Экз}i}$ — тепловой эффект окисления железа, кДж ; V_α, c — объем ($\text{м}^3/\text{м}^3$) и теплоемкость ($\text{кДж}/(\text{К}\cdot\text{м}^3)$) соответственно; $Q_{\text{Кл}i}$ — потери тепла через кладку в зоне i , кДж ; $Q_{\text{М}i}$ — тепло, усвоенное металлом в зоне i , кДж ; $\Delta\tau$ — продолжительность пребывания металла в элементарном объеме, ч.

Для настройки математической модели и подтверждения ее адекватности был выполнен расчет нагрева заготовок диаметром 270 мм, длиной 1,75 м из стали 45. На рис. 3 приведены результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных, полученных на кольцевой печи в условиях Днепропетровского металлургического комбината им. Дзержинского [1]. Их анализ показал, что расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 3,5%, что доказывает точность и адекватность предлагаемой математической модели.

В дальнейшем с использованием математической модели (1) — (6) осуществлены расчеты нагрева заготовок различного типоразмера и марок сталей. Основными исходными данными для расчета являются: температура уходящего дыма, производительность печи, марка нагреваемого металла, диаметр нагреваемых заготовок, длина заготовок, расстояние между осями нагреваемых заготовок, начальная температура металла, ограничения по температуре поверхности в момент выдачи металла, конечный температурный перепад по сечению заготовки, температура подогрева воздуха. Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 4. Из данных очевидно, что при достаточно широком сорimente нагреваемых заготовок по размерам и маркам сталей данная конструкция печи обеспечивает необходимое качество нагрева, т. е. допустимый температурный перепад к окончанию нагрева. Вместе с тем при нагреве заготовок крупных диаметров (230 — 300 мм) наблюдается увеличение несимметричности температурного поля по сечению заготовок, что требует дополнительного анализа способов устранения несимметричности. При этом технико-экономические показатели находятся на следующем уровне: производительность печи изменяется в пределах 45 т/ч, КПД печи равен 49 — 58%, удельный расход условного топлива составляет около 50 кг у. т/т. Вместе с тем данные

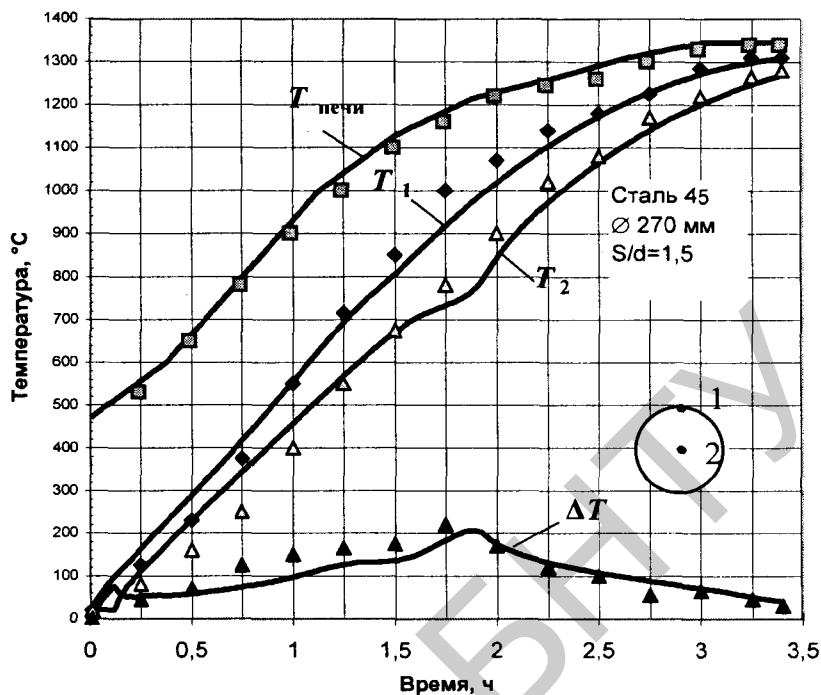


Рис. 3. Результаты сопоставительного расчета нагрева заготовок диаметром 0,27 м из стали 45 в кольцевой печи; маркеры — эксперимент, сплошные линии — расчет

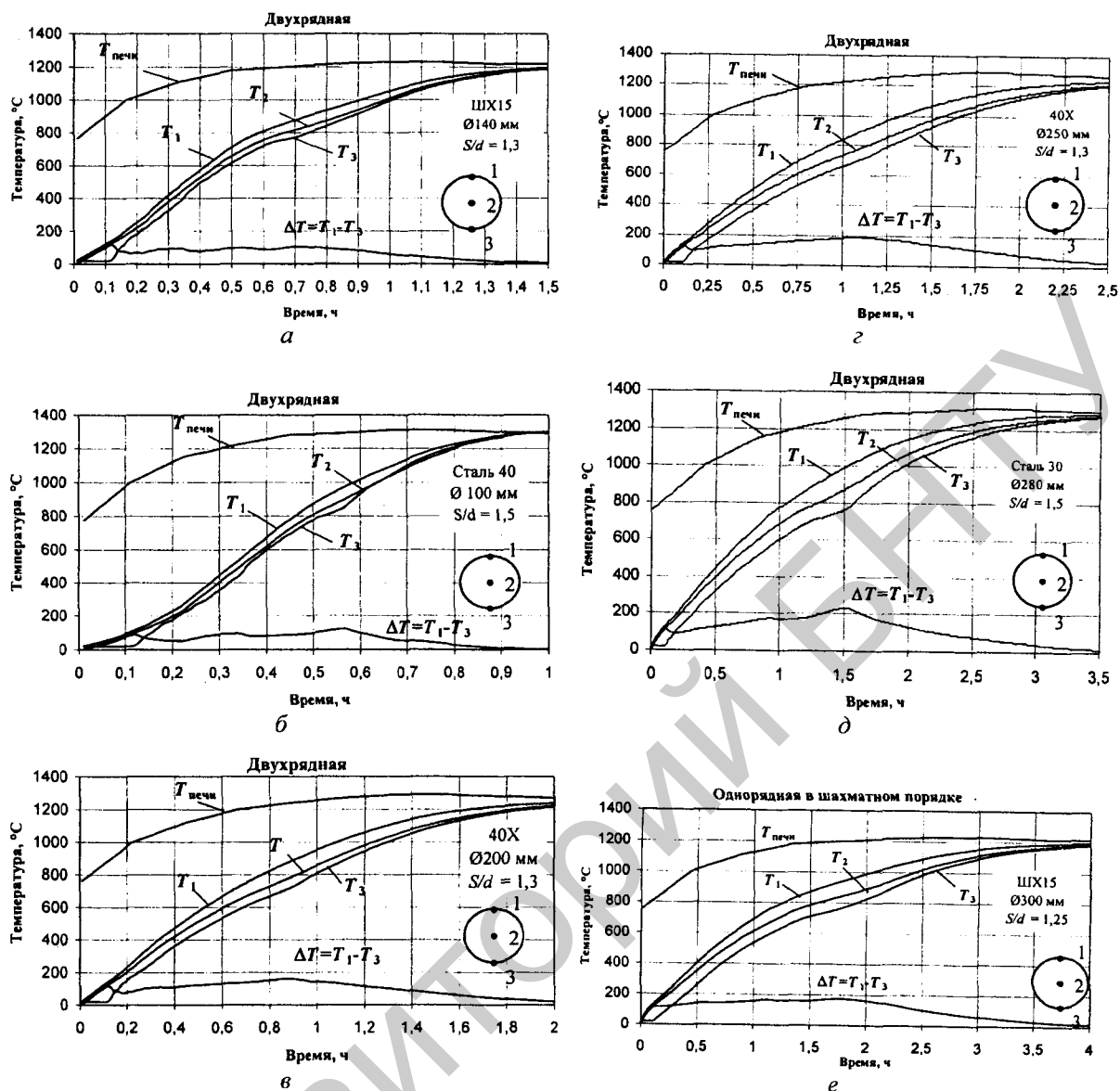


Рис. 4. Результаты расчета нагрева заготовок различных типоразмера и марок сталей в кольцевой печи (а — е)

показатели могут быть улучшены (например, за счет повышения температуры подогрева воздуха, снижения температуры уходящего газа, перераспределения теплового потока по длине печи и т. д.).

Выводы

1. Разработана математическая модель нагрева цилиндрических заготовок в кольцевых печах трубопрокатного производства, при этом учтены нелинейности I и II рода, неравномерность нагрева заготовок по периметру, а также конструктивные особенности печей, эксплуатационные показатели (нагрев на гладкой и деформированной подине) и др. Параметрическая идентификация математической модели показала надежность и адекватность реальному процессу нагрева, при этом расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышало 3,5%.

2. Выполнены расчеты нагрева заготовок диаметром 80 — 300 мм из углеродистых, легированных и высоколегированных марок сталей, используемых при производстве бесшовных горячедеформированных труб.

Литература

1. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Пекарский М. Я. Кольцевые печи: Теория и расчеты / Под общ. ред. В. И. Тимошпольского. Мн., 1993.

2. Сухов И. И., Фетцова Г. П., Шмонов Е. И. и др. // Сталь. 1981. № 8. С. 79–82.
3. Стальной слиток. В 3 т. Т. 3. Нагрев / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова и др.; Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. Мн., 2001.
4. Тимошпольский В. И., Сичевой А. П. // Сталь. 1984. № 12. С. 65–67.
5. Тимошпольский В. И., Дубина О. В., Козлов С. М., Трусова И. А. // Сб. науч. тр.: Металлургическая теплотехника. Днепропетровск, 2001. Т. 4. С. 162–167

V. I. TIMOSHPOLSKY, I. A. TRUSOVA, D. N. ANDRIANOV, S. M. KOZLOV, P. E. RATNIKOV

**THE MATHEMATICAL SIMULATION OF HEATING MODES
OF TUBE BILLETS IN CIRCULAR FURNACES**

Summary

A mathematical model of billet heating in circular furnaces considering variability of thermal physics of products heated, asymmetry of heating, constructive and operational parameters of a furnace is given by the authors. Results of the comparison of a computation solution of the mathematical model with the results of a full-scale experiment are shown in this work. Heating of pipe billet of various steel grades and different geometrical dimensions in circular furnace units is investigated.

Репозиторий БНТУ