

10. Nuclear Energy Institute – Issues & Policy – Protecting the Environment – Life Cycle Emissions Analyses. [www.nei.org/Issues-Policy/Protecting-the-Environment/Life-Cycle-emissions-analyses](http://www.nei.org/Issues-Policy/Protecting-the-Environment/Life-Cycle-emissions-analyses).

11. Journal of Energy Research and Environmental Technology (JERET) p-ISSN: 23941561; e-ISSN: 2394-157X; Volume 5, Issue 2; April-June, 2018.

12. USGCRP, 2017: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I [D.J. Wuebbles, D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 470 pp., doi: 10.7930/J0J964J6.

13. Pires da Mata Costa L., Micheline Vaz de Miranda D., Coutode Oliveira A.C.; Falcon L., StellaSilva Pimenta M., Guilherme Bessa I., Juarez Wouters S., Andrade M.H.S., Pinto J.C. Capture and Reuse of Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) for a Plastics Circular Economy // A Review. Processes. 2021. V. 9, 759.

14. Molina M. The Greatest Energy Story You Haven't Heard: How Investing in Energy Efficiency Changed the US Power Sector and Gave Us a Tool to Tackle Climate Change. (PDF). ACEEE. Archived (PDF) from the original on 14 January 2019.

УДК 621.78.013

**И. Б. Абдукодилов, А. В. Варгин**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА СЛЯБА В ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ**

**Аннотация.** *Нагрев слэбов перед горячей прокаткой необходим для придания металлу требуемых пластических свойств. Наиболее эффективны для этого печи с шагающими балками, обеспечивающие подачу теплоты со всех сторон слэба. Однако области нижних поверхностей слэбов, контактирующие с водоохлаждаемыми балками, экранированы от излучения нижних зон обогрева печи и отдают теплоту балкам. Для исследования неоднородности температурного поля слэбов и ее зависимости от особенностей конструкции системы их транспортировки разработана и программно реализована математическая модель нагрева слэба в печи с шагающими балками, основанная на численном решении трехмерной задачи теплопроводности с кусочно-определенными граничными условиями на нижней поверхности. Для открытых областей нижней поверхности слэба задавались такие же граничные условия, как на верхней поверхности, а для областей контакта с балками – модифицированные граничные условия, учитывающие продолжительность этого контакта. Проведены расчеты в приближении адиабатности участков контакта слэба с балками в период контакта, получены температурные поля для различных сечений слэба.*

**Ключевые слова:** *математическое моделирование, нагрев слэба, печь с шагающими балками, трехмерная задача теплопроводности, граничные условия, метод конечных разностей.*

**Abstract.** *Slab heating before hot rolling process is necessary for obtaining required metal ductility. The most effective for this purpose are furnaces with walking beams that provide heat supply from all sides of the slab. However, the places of slabs lower surfaces, contacting with wa-*

*ter-cooled beams, are shielded from the radiation of the furnace lower heating zones and give the heat to the beams. To study the inhomogeneity of the slab temperature field and its dependence on the peculiarities of their transport system design, a mathematical model of slab heating in a furnace with stepping beams, based on numerical solution of a three-dimensional heat conduction problem with piecewise defined boundary conditions on the lower surface, is developed and programmatically implemented. For the open areas of the bottom surface of the slab, the same boundary conditions were set as on the top surface, and for the areas of contact with the beams, modified boundary conditions were set, taking into account the duration of this contact. Calculations for adiabatic conditions at the slab-beam contact areas during the contact period have been performed, and the temperature fields for different slab sections have been obtained.*

**Key words:** *mathematical simulation, slab heating, furnace with walking beams, three-dimensional problem of thermal conductivity, boundary conditions, finite difference method.*

Современное производство листового проката ориентировано на выплавку стали в кислородных конвертерах и разливку на УНРС с последующей прокаткой слябов на станах горячей прокатки. Для придания металлу необходимых пластических свойств перед горячей прокаткой осуществляют нагрев слябов в проходных печах. Наиболее прогрессивными агрегатами для нагрева слябов являются печи с шагающими балками, обеспечивающие четырехстороннюю схему нагрева. Однако используемая для перемещения слябов система шагающих балок экранирует контактирующие с ними области нижней поверхности сляба от теплового излучения нижних зон обогрева, приводя к тому же к оттоку теплоты к охлаждаемым балкам. Наиболее плодотворным методом для исследования нагрева слябов в описанных условиях является математическое моделирование [1, 2]. Широкое распространение в настоящее время получили как статистические [3, 4], так и детерминированные [5, 6] модели.

Целью данной работы является разработка математической модели нагрева сляба в печи с шагающими балками с учетом воздействия этих балок на процесс нагрева.

Эта модель представляет собой трехмерную нестационарную задачу теплопроводности без внутренних источников теплоты с зависящими от температуры теплофизическими характеристиками в декартовой системе координат с несимметричными граничными условиями третьего рода, имеющими кусочный характер на нижней поверхности. Участки, на которые разбивается нижняя поверхность сляба, разделяются на три типа [6]:

1) всегда открытые участки, для которых задаются практически такие же граничные условия как для верхней поверхности;

2) участки, лежащие на неподвижных балках (и поэтому большую часть времени экранированные этими балками от излучения нижних зон обогрева и передающие теплоту балкам в результате контакта);

3) участки, контактирующие с подвижными балками (и во время этого контакта экранированные этими балками от излучения нижних зон обогрева и передающие теплоту балкам в результате контакта, а в остальное время – открытые для излучения).

Для участков нижней поверхности сляба, контактирующих с балками, в период контакта граничные условия третьего рода задаются как некоторый

условный коэффициент теплопередачи охлаждающей среде, циркулирующей в балках, и температура этой охлаждающей среды. Для адекватного задания названных коэффициентов теплопередачи необходима математическая модель тепловых процессов, происходящих внутри балок.

Транспортировка слябов осуществляется в несколько стадий, названия и продолжительности которых (применительно к печи №4 ЛПЦ-2 ОАО «Северсталь») приведены в таблице 1. Как видно из представленных данных, за один период выдачи (180 с) осуществляется три полных периода процесса транспортировки (56 с). При моделировании процесса нагрева изменение граничных условий в соответствии с этапами шагания представляется нецелесообразным, поскольку этот подход потребует очень маленьких шагов по времени, поэтому целесообразно задавать граничные условия на участках, контактирующих с балками, как средневзвешенный результат с учетом доли времени контакта – при таком подходе устраняется зависимость от кратности продолжительностей этапов шагания расчетным шагам по времени.

Таблица 1

Этапы работы механизма шагания и их длительность

Этап	Подъем	Шаг вперед	Опускание	Возврат	Период выдачи
Длительность, с	16	12	19	9	180

Программная реализация разработанной математической модели осуществлена в визуальной среде разработки Builder C++ версии 6.0. В расчетной программе осуществляется следующая последовательность действий:

- 1) ввод геометрии сляба (длина, ширина, высота), а также его теплофизических характеристик ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$ ) и начальной температуры;
- 2) ввод количества и геометрии (координаты, ширина) подвижных и неподвижных балок, а также коэффициентов теплопередачи и температуры охлаждающей среды для каждой из них;
- 3) ввод длительности этапов работы механизма шагания (согласно табл. 1);
- 4) ввод режима нагрева (количество этапов, и для каждого этапа: продолжительность, начальная и конечная температура греющей среды, коэффициенты теплоотдачи на каждой грани сляба);
- 5) ввод параметров расчетной схемы (шаг по времени  $\Delta t$ , количество разбиений сляба по координатам  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_z$ , степень невязности разностной схемы, метод решения системы разностных уравнений);
- 6) на каждом шаге по времени осуществляется вычисление граничных условий, решение системы разностных уравнений, вывод результатов.

Путем проведения вариантных расчетов подобраны параметры режима, позволяющие получить кривые нагрева сляба, соответствующие экспериментальным данным с печи №4 ЛПЦ-2 ОАО «Северсталь». Ввиду отсутствия модели теплопереноса внутри балок для коэффициентов теплопередачи задавались нулевые значения, т.е. был учтен только эффект экранирования балками нижней поверхности сляба.

На рисунке 1 изображено температурное поле (а) нижней поверхности сляба, (б) средней горизонтальной плоскости и (в) верхней поверхности сляба по окончании нагрева. Результаты получены для моделирования нагрева сляба размерами 250×500×6000 мм в печи, оснащенной четырьмя неподвижными и двумя подвижными балками, по четырехэтапному режиму, соответствующему прохождению через различные технологические зоны проходной печи с шагающими балками.

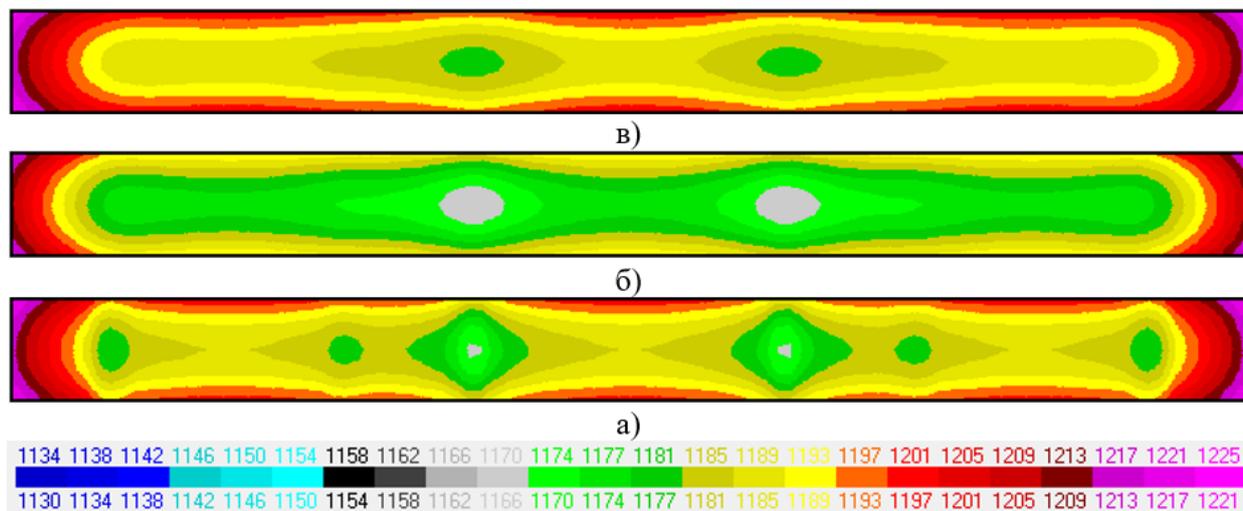


Рис. 1. Температурные поля нижнего (а), среднего (б) и верхнего (в) горизонтальных сечений сляба при адиабатном контакте

Как видно из представленных данных, неоднородность граничных условий на нижней поверхности сляба приводит к значительной неоднородности температурного поля на этой поверхности, которая сказывается и на температурном поле в средней плоскости сляба, и даже на температурном поле его верхней поверхности. Кроме того, можно видеть, что «холодные пятна» от неподвижных балок значительно сильнее выражены, чем от подвижных, что обусловлено различием времени контакта с соответствующими балками.

Разработанная модель может быть использована для исследования неоднородности температурного поля слябов и ее зависимости от разных особенностей конструкции системы транспортировки слябов в печи.

### Список использованных источников

1. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
2. Анализ методов математического моделирования процессов теплообмена в промышленных печах для нагрева металла / В.И. Тимошпольский, И.А.Трусова, Д.В. Менделеев // Литье и металлургия. 2012. № 2.

3. Belenkiy, A.M., Bogatova, M.Zh., Chibizova, S.I. Statistical modeling of heating metal in walking beam reheating furnace // Chernye Metally. 2021. №8. Pp. 32-37.

4. Bogatova, M.Zh., Chibizova, S.I. Statistical modeling of temperature operating modes of heating furnaces for hot strip mills // Izvestiya Ferrous Metallurgy. 2021. №64(5). Pp. 374-381.

5. Levitskiy I.A. The linear heat conduction problem for bodies with a regular shape under boundary conditions of the third kind // Chernye Metally. 2019. №10. Pp. 67-72.

6. Абдукодилов И.Б. Разработка математической модели нагрева сляба в печи с шагающими балками: диссертация магистра: 22.04.02/МИСиС. – М.: МИСиС, 2020. – 68 с.

УДК 621.776.04:621.783.2

**Ш. Х. Алламуродов, Н. Б. Лошкарев**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ НАГРЕВА КРУГЛЫХ ЗАГОТОВОК ПОД ПРОКАТКУ ШАРОВ**

**Аннотация.** *Выполнена разработка конструкции системы транспортировки круглых длинных заготовок в нагревательных и термических печах с помощью профилированных стационарных и подвижных балок, которые перемещаются только в вертикальном направлении.*

**Ключевые слова:** *транспортировка металла, печь, шаропрокатный стан, перекачивание круглых заготовок, упрощение конструкции.*

**Abstract.** *The design of a system for transporting long round billets in heating and thermal furnaces using profiled stationary and movable beams that move only in the vertical direction has been developed.*

**Key words:** *transportation of metal, furnace, ball rolling mill, rolling of round blanks, simplification of the design.*

Конструируемая печь предназначена обеспечивать стабильный нагрев углеродистых, низколегированных сталей марок: Сталь 40, 45, 50, 60 – ГОСТ 1050-2013, Сталь 35Х, 40Х, 45Х, 50Х – ГОСТ 4543-2016, сталь для мелющих шаров – ГОСТ 7524-15, прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали – ГОСТ 14959-79. Печь с подвижными балками обеспечивает нагрев до 1100 °С круглой заготовки диаметром 40, 50, 65 мм и длиной 7500 мм перед прокаткой на шаропрокатных станах ШПС-1, ШПС-2 СПЦ-1 с получением стальных мелющих шаров Ø 40, 50, 65 мм. Точность нагрева и разброс температур по сечению заготовки не должен превышать ±10 °С. Также печь с боковой выдачей обеспечивает производительность не менее 30,0 т/ч на заготовке длиной 7500 мм диаметром 65 мм, основным топливом является природный газ