



УДК 621.78.013

DOI 10.17073/0368-0797-2024-3-369-376



Оригинальная статья

Original article

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА СЛЯБА В ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ С УЧЕТОМ ИХ КРИВИЗНЫ

А. В. Варгин[✉], И. А. Левицкий

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

[✉ mr.vargin@yandex.ru](mailto:mr.vargin@yandex.ru)

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. Ранее авторами была разработана и программно реализована математическая модель нагрева слэба в печи с шагающими балками, основанная на численном решении методом конечных разностей трехмерной задачи теплопроводности с кусочно-определенными граничными условиями на нижней поверхности слэба. В этой модели для открытых областей нижней поверхности слэба задавались граничные условия, аналогичные условиям на верхней поверхности, а для областей контакта с балками – эффективные граничные условия, учитывающие продолжительность этого контакта. В данной работе модель нагрева слэба модифицирована, она позволяет учитывать кривизну балок и пересчитывать конфигурацию областей с различными граничными условиями на нижней поверхности слэба для каждого положения его вдоль печи. Вариантными расчетами при различных значениях интенсивности теплоотвода от нижних поверхностей слэба к балкам получено, что искривление одиночной балки может существенно изменить характеристику соответствующего «холодного» пятна, но оно практически не влияет на общую характеристику неравномерности нагрева слэба. Однако если искривлению подвергнуть все неподвижные балки, то существенно сокращается итоговый перепад по слэбу вследствие увеличения его минимальной температуры. Установлено, что влияние кривизны балок на температурное поле в конце нагрева тем больше, чем интенсивнее теплоотвод к балкам.

Ключевые слова: математическое моделирование, нагрев слэба, печь с шагающими балками, кривизна балок

Для цитирования: Варгин А.В., Левицкий И.А. Математическое моделирование нагрева слэба в печи с шагающими балками с учетом их кривизны. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(3):369–376. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-369-376>

MATHEMATICAL MODELING OF SLAB HEATING IN A FURNACE WITH WALKING BEAMS DUE TO THEIR CURVATURE

A. V. Vargin[✉], I. A. Levitskii

National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

[✉ mr.vargin@yandex.ru](mailto:mr.vargin@yandex.ru)

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 to all sides of the slab. However, the places of slabs lower surfaces, contacting with water-cooled beams, are shielded from the radiation of the furnace lower heating zones and give the heat to the beams. Previously, the authors developed and programmatically implemented a mathematical model of slab heating in a furnace with walking beams, based on the numerical solution by finite difference method of the three-dimensional heat conduction problem with piecewise defined boundary conditions on the slab bottom surface. In this model, for the open zones of the slab bottom surface, boundary conditions were similar to those on the top surface, and for the zones of contact with the beams were set effective boundary conditions assuming duration of this contact. In this paper, the model was modified to take into account the curvature of the beams and to recalculate the configuration of zones with different boundary conditions on the slab bottom surface for each position of the slab along the furnace. By variant calculations at different values of heat transfer intensity from the slab bottom surfaces to the beams it was determined that curvature of a single beam can significantly change the characteristic of the corresponding “cold” spot, but it practically

does not affect the general characteristic of the slab heating non-uniformity. If all fixed beams are subjected to curvature, the final temperature difference across the slab is significantly reduced due to an increase in its minimum temperature. It was found that the influence of beam curvature on the temperature field at the end of heating process is higher the more intensive the heat transfer to the beams is.

Keywords: mathematical modeling, slab heating, furnace with walking beams, curvature of beams

For citation: Vargin A.V., Levitskii I.A. Mathematical modeling of slab heating in a furnace with walking beams due to their curvature. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(3):369–376. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-3-369-376>

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее прогрессивными агрегатами, используемыми для нагрева слябов перед прокаткой в производстве горячекатаного листа, считаются печи с шагающими балками, в которых обеспечивается всесторонний подвод теплоты к поверхностям слябов [1]. Обычно такую схему подвода теплоты называют четырехсторонней, поскольку (что подтверждается опытом и расчетами) подвод теплоты к торцевым поверхностям слябов влияет на температурное поле лишь небольших участков слябов, прилегающих к этим поверхностям, а длина слябов в листопрокатном производстве во много раз больше их остальных размеров. Однако, несмотря на наличие нижней зоны обогрева в этих печах, условия подвода теплоты к верхней и нижней поверхностям нагреваемых слябов неодинаковы. Система транспортировки слябов содержит стационарные и подвижные балки, частично экранирующие от продуктов сгорания нижних зон обогрева, находящиеся с ними в контакте области нижней поверхности сляба, а также частично осуществляющие отвод теплоты к элементам системы охлаждения балок в местах контакта.

В результате на нижней поверхности слябов возникают «холодные пятна», влияние которых достигает не только внутренних горизонтальных сечений сляба, но и его верхней поверхности. Одним из способов уменьшения описанной неоднородности температурного поля является придание некоторой кривизны неподвижным балкам системы транспортировки, однако количественно этот эффект изучен недостаточно.

Экспериментальное исследование описанных выше факторов требует применения дорогостоящего современного оборудования [2] и в промышленных условиях затруднено. Поэтому оно используется обычно на этапах начала исследования (с целью получения первичной информации о его объекте) и его завершения (с целью проверки выработанных рекомендаций). Основная часть исследования осуществляется обычно путем математического моделирования процессов, происходящих в рабочем пространстве печи. Сравнение различных моделей нагрева металла в нагревательных печах [3] позволяет классифицировать их на статистические [4; 5], аналитические [6] и численные [7 – 10], причем в редких случаях рассматриваются не только прямые, но и обратные задачи теплопроводности [6; 11]. Математические модели печных процессов также широко применяются для решения оптими-

зационных задач [11 – 15] и используют возможности современных CFD-комплексов [16; 17].

В работе [18] предложена двумерная модель нагрева сляба в толкательной печи, отличительной особенностью которой является совместное решение задачи теплопроводности для нагреваемого сляба и участка опорной (глиссажной) трубы. Однако в этой модели труба направлена вдоль сляба, поэтому (с учетом двумерности модели) протяженность «холодного пятна» может отслеживаться только в направлении ширины сляба.

В работе [19] предложена трехмерная модель нагрева сляба в печи с переменными во времени граничными условиями, имитирующими прохождение слябом различных технологических зон проходной печи. Особенностью этой модели является возможность задания на нижней поверхности сляба кусочно-определенных граничных условий, различных для областей контакта этой поверхности с балками и открытых областей нижней поверхности сляба.

Целью настоящей работы является дальнейшее развитие математической модели нагрева сляба в печи с шагающими балками (с учетом воздействия этих балок на процесс нагрева) в направлении учета влияния возможной кривизны балок системы транспортировки на температурное поле сляба, и применение этой модели для проведения численных экспериментов.

Методы исследования

Разработанная модель представляет собой трехмерную задачу нестационарной теплопроводности в декартовой системе координат для расчетной области в форме параллелепипеда, без внутренних источников теплоты, с зависящими от температуры теплофизическими характеристиками и несимметричными переменными во времени граничными условиями третьего рода [19].

Эта дифференциальная задача не имеет аналитического решения, поэтому решать ее приходится численно, методом конечных разностей (методом баланса) [7; 19; 20].

Этот метод предполагает введение дискретного времени $t_k = k\Delta t$ ($k = 1, 2, \dots$) с постоянным шагом Δt и дискретных координат: $x_i = i\Delta x$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n_x$); $y_j = j\Delta y$ ($j = 0, 1, 2, \dots, n_y$); $z_l = l\Delta z$ ($l = 0, 1, 2, \dots, n_z$), которые для данной простой геометрии также изменяются с постоянными шагами Δx , Δy и Δz . Значения n_x , n_y и n_z

называют количеством разбиений заготовки вдоль каждого из координатных направлений.

В результате введения расчетной сетки вся расчетная область разбивается на элементарные объемы, количество которых равно $(n_x + 1)(n_y + 1)(n_z + 1)$. Каждый из этих объемов содержит один узел пространственной сетки, которая задается трехиндексной нумерацией (i, j, l) . На каждом шаге по времени для каждого элементарного объема записываются уравнения элементарного теплового баланса, образующие квазилинейную систему уравнений относительно узловых значений температуры в конце шага по времени. Решение ее общими методами (ввиду выраженной разреженности матрицы коэффициентов) нецелесообразно, в связи с чем более эффективными оказываются итерационные методы [19; 20], позволяющие отказаться от использования громоздких вспомогательных матриц.

Выбор в модели граничных условий третьего рода обусловлен их стабилизирующим влиянием на сходимость итерационного алгоритма, применяемого при решении трехмерной задачи теплопроводности.

В соответствии с этими граничными условиями связь плотности теплового потока q_w на граничной поверхности (например, на верхней поверхности сляба) с ее температурой T_w описывается формулой Ньютона-Рихмана:

$$q_w = \alpha(T_0 - T_w), \quad (1)$$

где T_0 – температура греющей среды, К; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Учет теплового влияния балок системы транспортировки на тепловые условия на нижней поверхности сляба осуществляется путем разбиения нижней поверхности сляба на прямоугольные участки и задания различных граничных условий для этих участков. Данные прямоугольные участки применительно к рассматриваемой задаче могут быть трех типов:

- всегда открытые части поверхности;
- части поверхности, контактирующие с неподвижными балками;
- части поверхности, контактирующие с подвижными балками (в периоды подъема и перемещения сляба).

Для всегда открытых участков нижней поверхности граничные условия аналогичны условиям на верхней поверхности сляба (1), но с той лишь разницей, что могут отличаться сами значения температуры греющей среды и коэффициента теплоотдачи. Для остальных участков такое условие справедливо лишь в периоды отсутствия контакта с балками. Однако и в периоды контакта с балками для соответствующих участков также можно формально использовать выражение типа (1). В этом случае в качестве температуры среды должна фигурировать температура пароводяной смеси, циркулирующей в системе охлаждения балок,

а в качестве коэффициента теплоотдачи – некоторый условный коэффициент теплопередачи k , Вт/(м²·К), от соответствующего участка нижней поверхности сляба к этой охлаждающей среде. Значение этого коэффициента зависит от конструкции системы транспортировки, и в данной модели является внешним (задаваемым) параметром [7; 19].

Цикл транспортировки сляба состоит из отдельных этапов (подъем сляба, перемещение вперед, опускание сляба, возврат подвижных балок в исходное положение), знание продолжительности которых (а также периода выдачи слябов из печи, периода раскладки слябов вдоль печи и хода штока системы транспортировки) позволяет в каждый момент времени задать граничные условия для каждой области нижней поверхности сляба. Однако такой подход требует производить расчет с шагом по времени не более 1 с, что может существенно увеличить продолжительность расчетной процедуры. В настоящей работе, как и в работе [19], применен более экономичный подход, позволяющий для каждой области контакта задавать средневзвешенные граничные условия типа (1), в которых фигурируют эффективный коэффициент теплоотдачи и эффективная температура среды. При этом вклад в эффективные значения характеристик отдельных периодов пропорционален их продолжительности.

В работе [19] разбиение нижней поверхности сляба на участки разного типа не меняется в процессе нагрева сляба, что соответствует прямым балкам. Особенностью настоящей работы является возможность задания кривизны балок путем представления их осевой линии в виде синусоиды, для которой задаются амплитуда (мм) и период (м). При задании значения амплитуды равным нулю балки считаются прямыми. При задании амплитуды (кривизны) отличной от нуля на каждом расчетном шаге по времени вычисляется продольная координата сляба относительно входного сечения печи, а затем для каждой балки (подвижной и неподвижной) рассчитывается отклонение границ пересечения со слябом относительно начального значения. Эта измененная область контакта сляба с балкой по-прежнему считается прямоугольной (ввиду относительной малости кривизны и ширины балки), но границы ее вдоль сляба смещаются, и уточнение этих границ в алгоритме, предлагаемом в настоящей работе, осуществляется на каждом расчетном шаге по времени.

Программная реализация созданной математической модели осуществлена в визуальной среде разработки Builder C++ версии 6.0. На рис. 1 представлено стартовое окно расчетной программы, в котором для всех балок (помимо их положения, ширины, коэффициента теплопередачи к охлаждающей среде и температуры этой среды) могут быть заданы характеристики кривизны в форме амплитуды синусоиды и ее периода (значения по умолчанию, отображенные на рис. 1, соответствуют прямым балкам).

Исходные данные | Режим | Адаптация

Сляб

Ширина (размер вдоль печи - x), мм: 500
 Толщина (размер по вертикали - y), мм: 250
 Длина (размер вдоль сляба - z), мм: 6000
 Зазор между слябами вдоль печи, мм: 40

$\lambda = 35 + 0.0001 \cdot t_w + 1e-5 \cdot t_w^2$, Вт/(м·К)
 $c = 300 + 0.003 \cdot t_w + 2.4e-6 \cdot t_w^2$, Дж/(кг·К)
 Плотность, кг/м³: 7850
 Начальная температура сляба, °C: 20

Подвижные балки

Общее количество подвижных балок: 4

№	Коорд. мм	Ширина, мм	k, Вт/(м²·К)	T, °C	Крив. мм	Период, м
1	-3675	150	0	190	0	100
2	-1395	150	0	190	0	100
3	1395	150	0	190	0	100
4	3675	150	0	190	0	100

Длительность различных этапов шага и период выдачи, с

Подъем	Шаг вперед	Шаг вниз	Шаг назад	П-д выдачи
16	12	19	9	180

Ход поршня (продольный шаг), мм: 480

Неподвижные балки

Общее количество неподвижных балок: 6

№	Коорд. мм	Ширина, мм	k, Вт/(м²·К)	T, °C	Крив. мм	Период, м
1	-4560	150	0	190	0	100
2	-2535	150	0	190	0	100
3	-754	150	0	190	0	100
4	754	150	0	190	0	100
5	2535	150	0	190	0	100
6	4560	150	0	190	0	100

Параметры разностной схемы

Количество разбиений по ширине (вдоль x): 10
 Количество разбиений по толщине (вдоль y): 10
 Количество разбиений по длине (вдоль z): 100
 Шаг по времени, с: 10
 Шаг по времени вывода на печать, с: 10
 Степень невязки схемы: 0,5
 Допустимая погрешность расчета температуры, °C: 0,001
 Коэффициент нижней релаксации: 0,5

☐ Метод расщепления
☒ Итерационный по x и z
☐ Простая итерация

☐ усреднение по низу сляба

Файлы Excel для сохранения результатов и/или считки исходных данных

☐ Считка исходных данных из файла
☐ Результаты будут записаны в файл

Расчет

Рис. 1. Исходные данные для моделирования

Fig. 1. Input data for modeling

Во вкладке «Режим» (на рис. 1 она закрыта) задаются значения температуры греющей среды и коэффициентов теплоотдачи на каждой грани сляба по этапам нагрева, соответствующим технологическим зонам. Как уже отмечалось, эти значения для всех граней сляба используются непосредственно, а на нижней грани без изменений применяются только к открытым областям, в то время как для областей контакта с балками эти значения используются для вычисления эффективных коэффициентов теплоотдачи и эффективной температуры среды.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 представлено изменение температуры вдоль продольной оси нижней поверхности сляба с размерами 250×500×6000 мм, нагретого в печи, оснащенной четырьмя неподвижными (оси показаны зеленой линией) и двумя подвижными (оси показаны синей линией) балками. Результаты получены для трех значений интенсивности передачи теплоты балкам:

- $k = 0$ Вт/(м²·К), соответствует учету только экранирующего эффекта балок;
- $k = 100$ Вт/(м²·К), приближенно соответствует реальным конструкциям рейтеров;
- $k = 50$ Вт/(м²·К), соответствует промежуточным значениям.

Для следующей серии расчетов моделировали искривление одной из неподвижных балок в соответствии с рис. 3. Искривление описали синусоидой

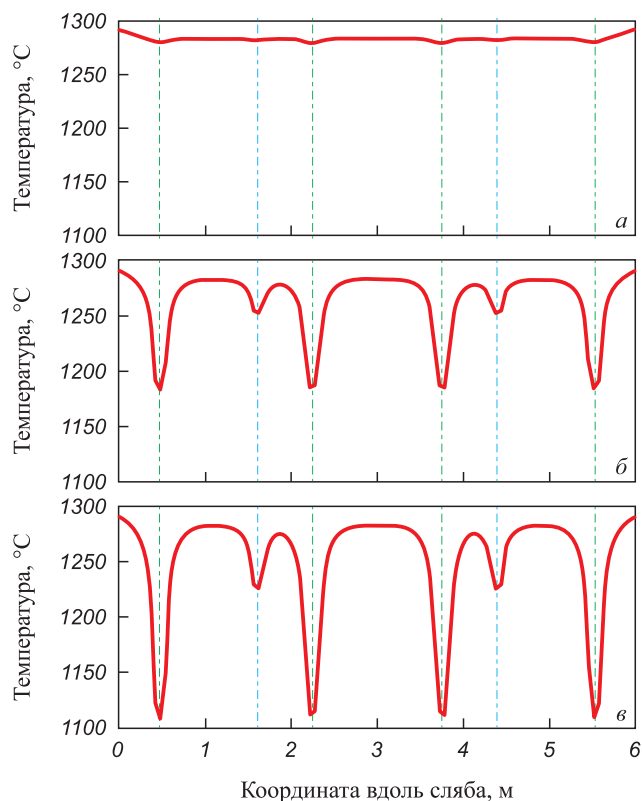


Рис. 2. Изменение температуры вдоль продольной оси нижней поверхности сляба при различной интенсивности теплоотвода к балкам:
 а – $k = 0$ Вт/(м²·К); б – $k = 50$ Вт/(м²·К); в – $k = 100$ Вт/(м²·К)

Fig. 2. Temperature change along longitudinal axis of the slab lower surface at different intensity of heat transfer to the beams:
 а – $k = 0$ W/(m²·K); б – $k = 50$ W/(m²·K); в – $k = 100$ W/(m²·K)

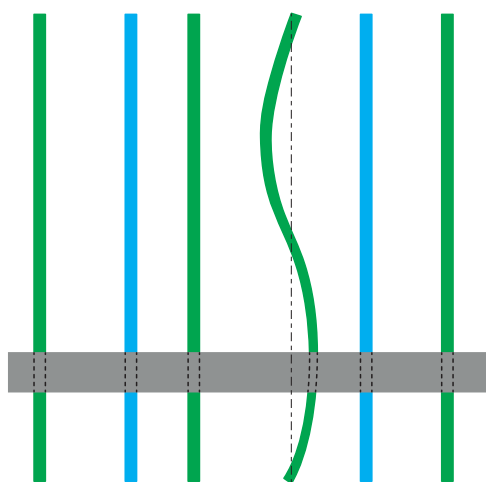


Рис. 3. Схема расположения сляба относительно балок печи при искривлении одной неподвижной балки:

■ – неподвижные балки; ■ – подвижные балки; ■ – сляб

Fig. 3. Layout of the slab in relation to the furnace beams when one fixed beam is curved:

■ – fixed beams; ■ – movable beams; ■ – slab

с амплитудой 200 мм и периодом 5 м (параметры кривизны соответствовали предельно возможным на практике значениям). Результаты моделирования нагрева сляба при этих условиях представлены на рис. 4.

Если в случае нулевой интенсивности теплоотвода (рис. 4, а) влияние искривления балки практически незаметно, то при увеличении интенсивности теплоотвода к балкам возникает заметная асимметрия температурного профиля (рис. 4, б в сравнении с рис. 2, б и рис. 4, в в сравнении с рис. 2, в).

При этом общие характеристики нагрева останутся практически такими же, как и для нагрева с прямыми балками (см. таблицу). В представленной таблице колонки «минимум» и «максимум» содержат минимальные и максимальные значения температуры по всему объему сляба в конце цикла нагрева, колонка «перепад» – разность между ними, а колонка «средняя» – среднемассовую температуру сляба в конце нагрева.

Экстремальные значения конечной температуры сляба для различных вариантов

Extreme values of the final slab temperature for different variants

Описание варианта	k , Вт/(м ² ·К)	Температурный показатель, °С			
		минимум	средняя	максимум	перепад
Прямые балки	0	1278,1	1286,0	1292,0	14,3
Прямые балки	50	1183,0	1278,8	1291,5	108,5
Прямые балки	100	1107,3	1273,3	1291,0	184,0
Одна балка искривлена	0	1277,7	1286,0	1292,0	14,3
Одна балка искривлена	50	1183,0	1278,9	1291,5	108,5
Одна балка искривлена	100	1107,3	1273,3	1291,3	184,0
Все неподвижные балки искривлены	100	1152,6	1273,5	1291,2	138,6

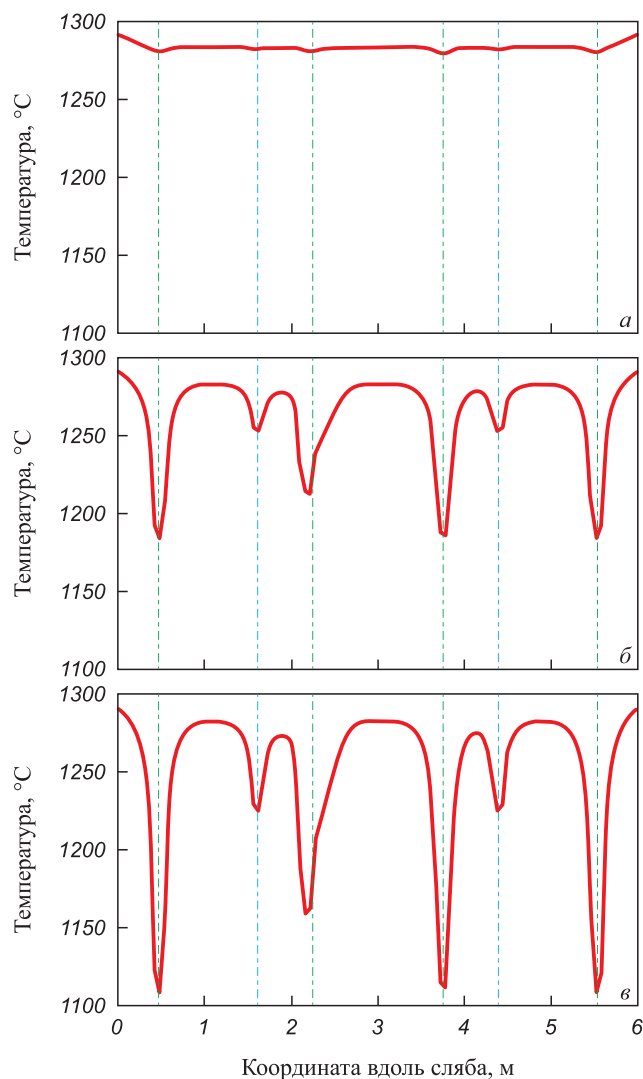


Рис. 4. Изменение температуры вдоль продольной оси нижней поверхности сляба при различной интенсивности теплоотвода к балкам при искривлении одной из балок: а – $k = 0$ Вт/(м²·К); б – $k = 50$ Вт/(м²·К); в – $k = 100$ Вт/(м²·К)

Fig. 4. Temperature change along longitudinal axis of the slab lower surface at different intensity of heat transfer to the beams when one beam is curved:

а – $k = 0$ W/(m²·K); б – $k = 50$ W/(m²·K); в – $k = 100$ W/(m²·K)

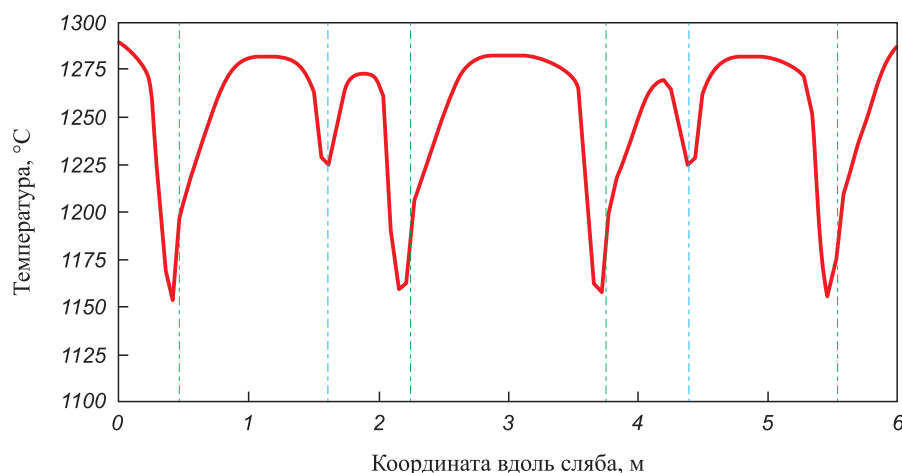


Рис. 5. Изменение температуры вдоль продольной оси нижней поверхности слэба при $k = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ при искривлении всех неподвижных балок

Fig. 5. Temperature change along longitudinal axis of the slab lower surface at $k = 100 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ when all fixed beams are curved

На рис. 5 представлен температурный профиль вдоль продольной оси нижней поверхности слэба для случая искривления всех неподвижных балок.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как видно из полученных результатов, для неподвижных балок «пятно» воздействия глубже (т. е. «холоднее»), чем для подвижных балок. Это обусловлено тем, что при заданных значениях ширины слэба, периода выдачи и параметров механизма транспортировки время контакта участков нижней поверхности слэба с неподвижными балками больше, чем с подвижными.

Наличие теплоотвода от слэбов к балкам создает гораздо большую неравномерность температуры нижней поверхности, чем просто экранирование ее от излучения продуктов сгорания нижних зон обогрева, как видно на рис. 2. Искривление одиночной балки может существенно изменить характеристику соответствующего «холодного» пятна, и этот эффект тем больше, чем сильнее теплоотвод к балкам (рис. 4, б, в). Однако он практически не влияет на общую характеристику неравномерности нагрева (см. таблицу), поскольку при искривлении балки площадь контакта с ней поверхности слэба не изменяется, а только «размазывается» во времени. Но если искривлению подвергнуть все неподвижные балки, то существенно сокращается итоговый перепад по слэбу вследствие увеличения его минимальной температуры, что приводит к повышению однородности температурного поля слэба.

Выводы

Ранее разработанная и программно реализованная авторами математическая модель нагрева слэба в печи

с шагающими балками, учитывающая воздействие этих балок на нижнюю поверхность слэба, модифицирована путем дополнения возможности учета кривизны балок.

Для печи, оснащенной четырьмя неподвижными и двумя подвижными балками, смоделирован нагрев слэба $250 \times 500 \times 6000 \text{ мм}$ по штатному режиму при различной интенсивности теплоотвода к балкам для случаев прямых и искривленных балок.

Установлено, что интенсивность теплоотвода к балкам существенно влияет как на уровень температурного поля слэба, так и на его однородность.

В результате вариантных расчетов получено, что искривление только одной балки изменяет локальные характеристики соответствующего «холодного» пятна, практически не влияя на минимальные, максимальные и среднемассовые значения температуры слэба, а искривление всех балок (как минимум, одного типа) повышает минимальную температуру слэба и увеличивает однородность температурного поля слэба в целом. При этом влияние кривизны балок на температурное поле в конце нагрева (в частности, на его однородность) тем выше, чем интенсивнее теплоотвод к балкам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей: Учебно-справочное издание. Москва: Теплотехник; 2004:400.
2. Улановский А.А., Тааке М., Беленький А.М., Бурсин А.Н., Чибизова С.И. Использование автономной автоматизированной системы фирмы Phoenix ТМ для мониторинга температурного поля нагреваемого металла в металлургических печах. *Черные металлы*. 2019; (9):54–60.

- Ulanovskii A.A., Taake M., Belen'kii A.M., Bur-sin A.N., Chibizova S.I. Using a Phoenix TM autonomous automated system for monitoring temperature field of metal heated in metallurgical furnaces. *Chernye Metally*. 2019;(9):54–60. (In Russ.).
3. Singh V.K., Talukdar P. Comparisons of different heat transfer models of a walking beam type reheat furnace. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013; 47:20–26.
<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.06.004>
4. Беленький А.М., Богатова М.Ж., Чибизова С.И. Статистическое моделирование нагрева металла в печах с шагающими балками. *Черные металлы*. 2021;(8):32–37.
<https://doi.org/10.17580/chm.2021.08.06>
Belen'kii A.M., Bogatova M.Zh., Chibizova S.I. Statistical modeling of metal heating in furnaces with walking beams. *Chernye Metally*. 2021;(8):32–37. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/chm.2021.08.06>
5. Богатова М.Ж., Чибизова С.И. Статистическое моделирование температурных режимов работы нагревательных печей листовых станов горячей прокатки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(5):374–381.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-374-381>
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):374–381. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-374-381>
6. Левицкий И.А. Линейная задача теплопроводности для тел правильной формы при граничных условиях третьего рода. *Черные металлы*. 2019;(10):67–72.
Levitskii I.A. The linear heat conduction problem for bodies with a regular shape under boundary conditions of the third kind. *Chernye Metally*. 2019;(10):67–72. (In Russ.).
7. Абдукодилов И.Б. Математическая модель нагрева сляба в печи с шагающими балками: Диссертация магистра: 22.04.02: Москва; 2020:68.
8. Han S.H., Chang D., Kim C.Y. A numerical analysis of slab heating characteristics in a walking beam type reheating furnace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53(19–20):3855–3861.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.002>
9. Курносов В.В., Левицкий И.А., Прибытков И.А. Исследование нагрева массивных заготовок с различными скоростями в печах периодического действия. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2012;55(9):27–31.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-9-27-31>
Kurnosov V.V., Levitskii I.A., Pribytkov I.A. Massive billets different rates heating in batch furnaces study. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012;55(9):27–31. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-9-27-31>
10. Landfahner M., Schluck C. Numerical and experimental investigation of scale formation on steel tubes in a real-size reheating furnace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;129:460–467.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.110>
11. Курносов В.В., Левицкий И.А. Математическое моделирование нагрева заготовок с переменными теплофизическими характеристиками и теплового режима, соответствующего заданному графику нагрева. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2012;55(7):19–22.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-7-19-22>
Kurnosov V.V., Levitskii I.A. Mathematic simulation of workpieces heating with variable thermal characteristics and thermal condition, corresponding to a given heating curve. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012;55(7):19–22. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2012-7-19-22>
12. Jang J.-Y., Huang J.-B. Optimization of a slab heating pattern for minimum energy consumption in a walking-beam type reheating furnace. *Applied Thermal Engineering*. 2015;85:313–321.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.04.029>
13. Tang G., Wu B., Bai D., Wang Y., Bodnar R., Zhou C.Q. Modeling of the slab heating process in a walking beam reheating furnace for process optimization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;113:1142–1151.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.026>
14. Ding J.G., Kong L.P., Guo J.H., Song M.X., Jiao Z.J. Multi-objective optimization of slab heating process in walking beam reheating furnace based on particle swarm optimization algorithm. *Steel Research International*. 2021;92(3): 2000382. <https://doi.org/10.1002/srin.202000382>
15. Tang L., Liu J., Rong A., Yang Z. An effective heuristic algorithm to minimize stack shuffles in selecting steel slabs from the slab yard for heating and rolling. *Journal of the Operational Research Society*. 2001;52(10):1091–1097.
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601143>
16. Tang G., Wu B., Wang Y., Bodnar R., Zhou C. CFD modeling and validation of a dynamic slab heating process in an industrial walking beam reheating furnace. *Applied Thermal Engineering*. 2018;132:779–789.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.017>
17. Mayr B., Prieler R., Demuth M., Moderer L., Hochenauer C. CFD analysis of a pusher type reheating furnace and the billet heating characteristic. *Applied Thermal Engineering*. 2017;115:986–994.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.01.028>
18. Дружинин Г.М., Самойлович Ю.А., Попов Е.В. Способы снижения термической неоднородности массивных стальных слябов при нагреве в методических нагревательных печах. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2013;56(7):27–32.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-7-27-32>
Druzhinin G.M., Samoilovich Yu.A., Popov E.V. Ways to reduce the thermal heterogeneity of massive steel slabs by heating in through the heating furnaces. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013;56(7):27–32. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-7-27-32>
19. Абдукодилов И.Б., Варгин А.В., Левицкий И.А. Математическая модель нагрева сляба в печи с шагающими балками. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023;66(1):112–118.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-112-118>
Abdukodirov I.B., Vargin A.V., Levitskii I.A. Simulation of slab heating in a walking beam furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;65(11):112–118.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-1-112-118>
20. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. Москва: Металлургия; 1990:239.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Вячеславович Варгин, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0001-8657-8716

E-mail: mr.vargin@yandex.ru

Игорь Анисимович Левицкий, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0002-9345-3628

E-mail: lewwwis@mail.ru

Aleksandr V. Vargin, Postgraduate of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0001-8657-8716

E-mail: mr.vargin@yandex.ru

Igor’ A. Levitskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-9345-3628

E-mail: lewwwis@mail.ru

Поступила в редакцию 14.09.2023

После доработки 08.01.2024

Принята к публикации 28.02.2024

Received 14.09.2023

Revised 08.01.2024

Accepted 28.02.2024