



On the basis of the method of finite elements there are solved the problems for calculation of temperature fields of the pacing beams riders and thermal stresses in the continuous cast slugs taking into account cooling of the lower part of slugs at heating in the furnaces of modern construction (with pacing beams).

Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПП «ПЛАТАН», г. Екатеринбург,
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, Д. Н. АНДРИАНОВ, БНТУ,
В. А. МАТОЧКИН, РУП "БМЗ"

УДК 621.78.013:621.771.25

РАСЧЕТЫ НАГРЕВА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК В ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ С УЧЕТОМ ПОДХОЛАЖИВАНИЯ НИЖНЕЙ ЧАСТИ ЗАГОТОВОК

Введение

В настоящее время на современных металлургических предприятиях для нагрева стальных слитков и заготовок получают распространение печи с шагающими балками и шагающим подом, обладающие существенными преимуществами по сравнению с нагревательными печами других конструкций [1–4].

Основными особенностями печей с шагающими балками является расположение в них заготовок с зазором и использование водоохлаждаемых рейтеров, представляющих собой насадки из жаропрочной стали, которые, в свою очередь, привариваются к подовым трубам и служат опорой для перемещаемых заготовок. Режим шагания при нагреве металла в печах с шагающими балками приводит к периодической смене условий теплообмена у нижней поверхности заготовок, перемещаемых вдоль печи. Такая периодичность вызывает колебания температуры нижней поверхности заготовок, что при определенных условиях может привести к их неравномерному нагреву, а в худшем случае — к нарушению сплошности нагреваемого металла.

В связи с изложенным представляет интерес анализ температурного поля заготовок и возникающих в ней термических напряжений с учетом теплового влияния водоохлаждаемых рейтеров при перемещении заготовки вдоль печи с шагающими балками.

В работе [5] приведены результаты экспериментов по оценке интенсивности теплообмена между рейтером и стальной заготовкой, выполненные группой сотрудников ВНИИМТ. Исследование температурных полей в нагреваемой стальной заготовке и сечении рейтера проводили в условиях, близких к промышленным (для случая нагрева заготовок сечением 115x115 мм перед прокаткой на мелкосортном стане). Основной вывод результатов исследований состоит в том, что температуры верхней площадки коронки рейтера и нижней поверхности сляба практически совпадают, что свидетельствует о достаточно высокой интенсивности теплообмена между коронкой рейтера и нагреваемым металлом. Аналогичный результат получен в экспериментах Г.А. Шапова, выполненных в промышленных условиях, при нагреве непрерывнолитых стальных слябов толщиной 220 мм в печи с шагающими балками стана 2000 Новолипецкого металлургического комбината [6].

Постановка математической модели

Уравнения нестационарной теплопроводности для заготовок, нагреваемых в печи с шагающими балками, имеют вид

$$\rho c \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \nabla[\lambda \nabla T(r, t)], \quad (1)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T(r, t)}{\partial n} \right|_{\text{пов}} = \alpha_k (T_s - T_{\text{пов}}) + \sigma_b (T_s^4 - T_{\text{пов}}^4), \quad (2)$$

$$T(r, 0) = f(r) \text{ при } t=0, \quad (3)$$

где теплофизические свойства металла ρ , c , λ в общем случае являются известными функциями от локальных значений температуры; T_s — температура охлаждающей среды (печи); α_k , σ_b — коэффициенты переноса теплоты конвекцией и излучением на поверхности нагреваемых изделий.

Учитывая сложную геометрическую форму и теплообмен между рейтером и заготовкой, приводящий к неравномерному распределению температуры по нижней поверхности заготовки, для решения сформулированной задачи (1)–(3) использован метод конечных элементов.

Суть метода заключается в минимизации определенного функционала, представляющего собой интеграл от неизвестных значений температуры на различных участках объекта. При этом изучаемая непрерывная функция заменяется набором дискретных значений, поле которых строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определяемых для некоторых участков объекта (подобластей), называемых конечными элементами. Реализация исходной задачи базируется на применении математического аппарата теории матриц, обладающего высокой степенью универсальности в отношении решения большинства современных задач математической физики [7, 8].

Для трех пространственных измерений (x, y, z) вариационная постановка задачи осуществляется путем введения интеграла по области

$$\kappa(T) = \int_{(V)} f(x, y, z, t, T, \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}) dx dy dz, \quad (4)$$

который принимает минимальное значение при соблюдении дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial f}{\partial (\partial T / \partial x)} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial f}{\partial (\partial T / \partial y)} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial f}{\partial (\partial T / \partial z)} \right] - \frac{\partial f}{\partial T} = 0 \quad (5)$$

при условии, что функция $T(x, y, z, t)$ удовлетворяет граничным условиям задачи.

Запишем уравнение нестационарной теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

при соблюдении граничных условий:

$$\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} + \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha(T - T_{cp}) = 0. \quad (7)$$

Нетрудно убедиться в том, что уравнение (6) эквивалентно требованию минимизации интеграла

$$\kappa(T) = \int_{(V)} \frac{1}{2} \left[\lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 + 2\rho c_p T \frac{\partial T}{\partial t} \right] dV + \int_{(S)} \frac{\alpha}{2} (T^2 - 2TT_{cp} + T_{cp}^2) dS \quad (8)$$

по всей области при соблюдении граничных условий задачи.

Далее осуществляется преобразование функционала (5) путем введения двух матриц

$$\{g\}^T = \left[\frac{\partial T}{\partial x} \quad \frac{\partial T}{\partial y} \quad \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad D = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Теперь соотношение (8) может быть записано в виде

$$\kappa(T) = \int_{(V)} \frac{1}{2} \{g\}^T [D] \{g\} dV + \int_{(V)} \rho c_p T \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_{(S)} \frac{\alpha}{2} (T^2 - 2TT_{cp} + T_{cp}^2) dS. \quad (10)$$

Искомая непрерывная функция T заменяется набором функций T_p , определенных на конечных элементах (подобластях) изучаемого объекта. При этом интегралы в уравнении (10) могут быть разбиты на интегралы по отдельным элементам, что приводит к соотношениям:

$$\kappa(T) = \sum_{i=1}^M \int_{(V_i)} \frac{1}{2} \{g_i\}^T [D_i] \{g_i\} dV_i + \sum_{i=1}^M \int_{(V_i)} \rho c_p T_i \frac{\partial T_i}{\partial t} dV_i + \sum_{j=1}^m \int_{(S_j)} \frac{\alpha_j}{2} (T_j T_j - 2T_j T_{cp} + T_{cp}^2) dS_j, \quad (11)$$

где M – общее число конечных элементов системы; m – число участков поверхности тел.

Вводя в рассмотрение определенные «функции формы» Φ_p , удастся привести систему уравнений (8) к следующей системе дифференциальных матричных уравнений [4, с. 202]:

$$[C] \frac{\partial \{\Phi\}}{\partial t} + [K] \{\Phi\} + \{F\} = 0, \quad (12)$$

где матрицы $[K]$, $[C]$ и $\{F\}$ определяются формулами, приведенными в работе [8].

Таким образом, с учетом изложенного запишем исходную задачу в матричной форме:

$$[C] \frac{\partial \{T(t)\}}{\partial t} + [K] \{T(t)\} + \{T(t)\} = 0, \quad (13)$$

где выражения $[K]$, $[C]$, $\{T(t)\}$ носят название «матрица жесткости», «матрица деформирования» и «вектор внешней нагрузки».

В качестве примера использования приведенного алгоритма рассмотрим задачу нагрева непрерывнолитых заготовок сечением 250x300 мм в печи с шагающими балками стана 850 РУП «Белорусский металлургический завод». На рис. 1 показана схема разбиения расчетной области заготовки на 664 элемента треугольной формы, причем начало координат $x = 0$, $y = 0$ принято в левом нижнем углу сечения заготовки. Результаты расчета нагрева заготовки размерами поперечного сечения 250x300 мм из стали ШХ15СГ и экспериментальные кривые изменения температур в наиболее характерных точках сечения заготовки, полученные в промышленных условиях, приведены на рис. 2. Из сравнения расчетных и экспериментальных данных очевидна удовлетворительная сходимость результатов.

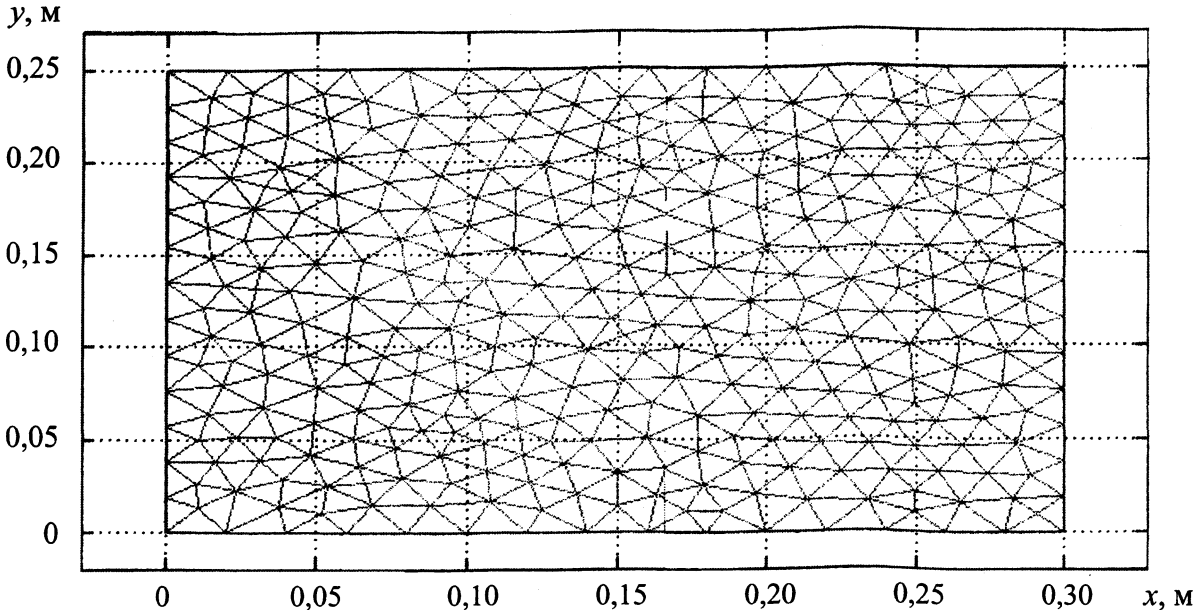


Рис. 1. Схема разбиения поперечного сечения заготовки размерами 250x300 мм треугольными элементами расчетной сетки при использовании метода конечных элементов

На последующем этапе с использованием расчетного температурного поля осуществили оценку термических напряжений по сечению заготовки. При постановке задачи термоупругости для нагреваемых заготовок с прямоугольным поперечным сечением использована известная гипотеза «плоской деформации» ($\epsilon_z = \text{const}$), когда из всех компонент тензора напряжений остается три главных (σ_x , σ_y и τ_{xy}), связанных с компонентами тензора деформаций соотношениями:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = D \left\{ \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha \\ \alpha \\ 0 \end{bmatrix} (1+\nu)(T-T_0) \right\}, \quad (14)$$

где D – тензор упругих констант материала:

$$D = \frac{E(T)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

В данном случае уравнения равновесия принимают вид

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = k_x, \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = k_y, \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = k_z, \quad (16)$$

где k – вектор объемных сил.

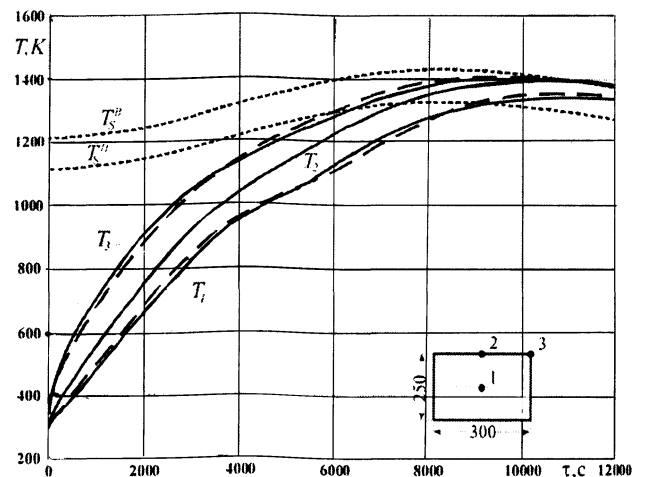


Рис. 2. Расчетные (—) и экспериментальные (---) графики изменения температуры в нагреваемой заготовке сечением 250x300 мм при нагреве в проходной печи стана 850 РУП «БМЗ»

При решении задачи используется предположение об отсутствии внешних нагрузок на заготовку, а на границах расчетного сечения приняты условия обращения в нуль соответствующих компонент тензора напряжений. В ходе расчетов учитывается изменение модуля упругости стали в зависимости от температуры.

Результаты расчета термических напряжений при нагреве заготовки в соответствии с температурным режимом, приведенным на рис. 2, представлены на рис. 3. Анализ возникающих по сечению заготовки термонапряжений позволяет сделать вывод о том, что при нагреве заготовки в осевой зоне возникают значительные растягивающие термические напряжения, однако их максимальные значения (115–120 МПа) ниже показателей временного сопротивления стали ШХ15СГ при комнатной температуре ($\sigma_b = 900\text{--}1000$ МПа). Вместе с этим влияние водоохлаждаемого рейтера на распределение температурного поля в заготовке может привести к возникновению термических напряжений, превышающих расчетную величину.

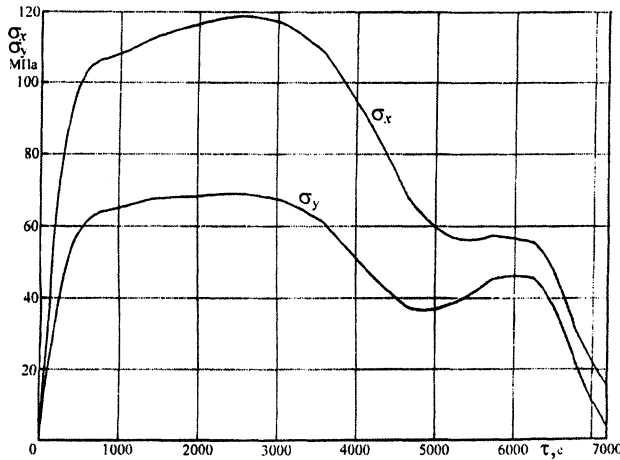


Рис. 3. Распределение напряжений σ_x и σ_y в центре сечения заготовки (т. 1 на схеме, приведенной на рис. 2)

где T_R и T_m – средние значения температур верхней площадки рейтера и контактной зоны заготовки;
 $T_{1,0} = f_1(x, y, 0), \quad T_{2,0} = f_2(x, y, 0).$

Обсуждение результатов

Результаты решения поставленной таким образом задачи (17)–(20) приведены на рис. 4, 5. Для коронки рейтера (рис. 4) расчеты иллюстрируют колебания температуры на верхнем участке коронки (т. 1) с амплитудой 60–70°, что находится в соответствии с экспериментальными данными работы [6].

Периодическое воздействие нагретой коронки рейтера на нижнюю поверхность заготовки приводит к искажению изотерм на участке контакта рейтера с заготовкой и возникновению локальных термических «волн» (рис. 5). Таким образом, периодический (с частотой шагания) контакт холодной заготовки с разогретым рейтером сопровождается образованием на нижней поверхности заготовки локальных «очагов» разогрева, что должно приводить к возникновению волн растяжения-сжатия в нижних слоях нагреваемой заготовки.

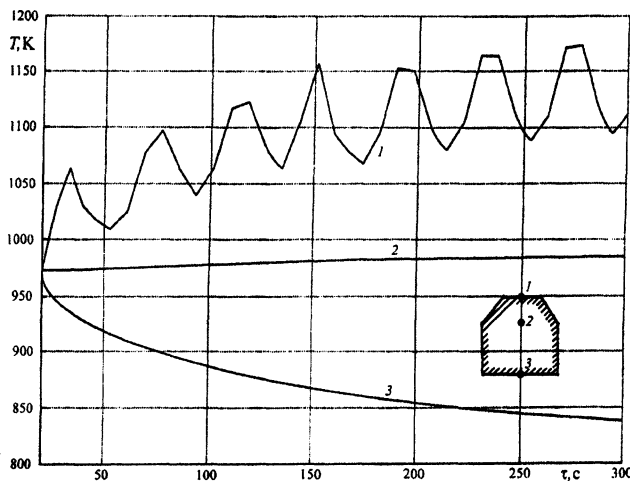


Рис. 4. Изменение во времени температуры в трех характерных точках сечения коронки рейтера шагающих балок проходной печи стана 850 РУП «БМЗ»: посередине верхней площадки коронки (1), в среднем по высоте сечения коронки (2) и посередине нижнего основания коронки рейтера (3)

Сформулируем задачу нестационарной теплопроводности для системы двух подсистем – коронки рейтера и участка нагреваемой заготовки, контактирующего с рейтером шагающей балки, в виде следующих уравнений:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right), \quad (i=1, 2), \quad (17)$$

на участках подсистем, взаимодействующих с печной атмосферой:

$$-\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = \alpha_k (T_S - T_{\text{пов},i}) + \sigma_b (T_S^4 - T_{\text{пов},i}^4), \quad (18)$$

на участке теплового контакта коронки рейтера с нижней поверхностью заготовки

$$\pm \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = \alpha_{\text{конт}} (T_m - T_R), \quad (i=1, 2), \quad (19)$$

где T_R и T_m – средние значения температур верхней площадки рейтера и контактной зоны заготовки;

По-видимому, амплитуда волн термических напряжений вследствие воздействия рейтера сравнительно невелика, причем действие указанных волн локализовано на весьма малых участках поверхности заготовок.

Однако следует иметь в виду, что воздействие периодической во времени (вибрационной) нагрузки может оказать существенное влияние на условия сохранения равновесия в изделии, находящемся под влиянием всесторонних растягивающих напряжений, амплитуда которых близка к пределу хрупкости (или временному сопротивлению) материала. Учитывая наличие дефектов

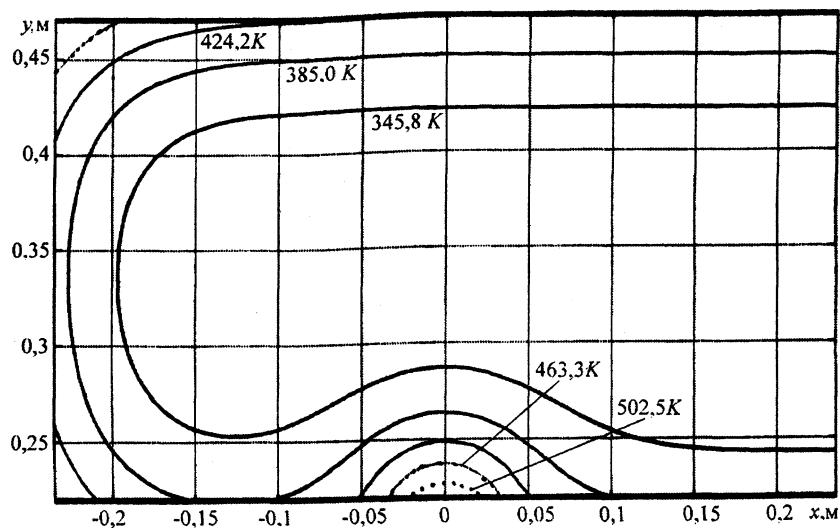


Рис. 5. Распределение изотерм в сечении заготовки размерами 250x300 мм из стали ШХ15СГ в момент времени $t = 360$ с при задании $\alpha_{\text{конт}} = 1000$ Вт/(м²·К), $T_R = 1123$ К

(включения карбидов, сульфидов, локальных трещин), можно предположить, что воздействие «вибрационных» локальных термических напряжений способно существенно ослабить сопротивляемость литой стали и способствовать возникновению трещин при нагреве заготовок, особенно легированных марок сталей, при холодном посаде в нагревательную печь с шагающими балками.

Заключение

Разработаны и решены с использованием метода конечных элементов математические модели для расчета полей температур рейтеров шагающих балок и термических напряжений в непрерывно-

литых заготовках с учетом влияния рейтера при нагреве металла в печах с шагающими балками.

Показано, что при разработке технологий нагрева сталей с пониженными пластическими характеристиками в печах с шагающими балками необходимо наряду с величиной суммарных термических напряжений, возникающих в процессе охлаждения после разливки и нагрева заготовок в печи, учитывать особенности условий теплообмена между заготовками и рейтерами, расположенными на различных участках нагревательной печи.

Литература

1. Справочник конструктора печей прокатного производства / Под ред. В.М. Тымчака (в двух томах). М.: Металлургия, 1970.
2. Гусовский В.Л., Ладыгичев М.Г., Усачев А.Б. Современные нагревательные и термические печи: М.: Машиностроение, 2001.
3. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 3. Нагрев / В.И. Тимошпольский, Ю.А. Самойлович, И.А. Трусова, В.В. Филиппов; Под ред. В.И. Тимошпольского и Ю.А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2001.
4. Комплексная методология разработки экономичных режимов нагрева стали в печах / В.И. Тимошпольский, В.А. Тищенко, С.М. Козлов и др. // Сталь. 2002. № 10. С. 102–107.
5. Королев Н.М., Волков В.М., Демина Н.Б., Вязников В.Г. Тепловые характеристики металла, нагреваемого на шагающих балках с рейтерами // Металлургическая теплотехника. М.: Металлургия, 1972. С. 62–67.
6. Шапов Г.А. Температура рейтеров в печи с шагающими балками // Сталь. 1980. № 9. С. 833–834.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
8. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.