

Литература

1. Бутковский, А. Г. Управление нагревом металла / А. Г. Бутковский, С. А. Малый. – М.: Metallurgy, 1981.
2. Кламмер, Г. Системы управления процессом в камерных печах / Г. Кламмер, В. Шуппе // Черные металлы. – 1984. – № 19. – С.10-17.
3. Григорьев, В. Н. Повышение эффективности использования топлива в промышленных печах / В.Н. Григорьев. – М.: Metallurgy, 1977. – 282 С.
4. Мастрюков, Б. С. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей / Б.С. Мастрюков. – М.: Metallurgy, 1986. – 370 С.
5. Лазич, Л. Влияние высоты печи на ее характеристики при косвенном радиационном теплообмене / Л. Лазич, Н.П. Свинолов, В.Л. Бровкин // Сб науч. трудов: Металлургическая теплотехника. – Днепропетровск, 2006. – С. 194 – 208.

УДК 669.04

И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
Д.В. МЕНДЕЛЕВ,
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,
С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук (БНТУ)

ПОДБОР КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОХОДНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК ПОД ШТАМПОВКУ С ЦЕЛЮ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Выбор оптимальных конструктивных и технических параметров проходной нагревательной печи должен базироваться на математическом моделировании процессов, происходящих при нагреве металла, проведении соответствующих расчетов и анализе полученных результатов.

В типовых нагревательных проходных печах машиностроительного производства заготовки конструктивно располагаются в виде длинных ручьев (расположение заготовок: торец к торцу). На-

грев заготовок происходит за счет процессов излучения футеровки печи и других заготовок, а также излучения и конвекции дымовых газов. Поэтому в качестве моделируемого процесса рассмотрен процесс радиационно-конвективного нагрева неограниченных цилиндров в количестве n штук (n – количество ручьев) с граничными условиями, учитывающими теплообмен с торцов заготовки. В связи со сложностью решения такой задачи, как аналитическим путем, так и численными методами, целесообразно упростить ее до двухмерной постановки: нагрев неограниченных цилиндров с переменными теплофизическими свойствами при граничных условиях третьего рода.

Такой переход от трехмерной к двухмерной постановке задачи, при котором рассматривается только сечение заготовки, возможен,

если длина цилиндра значительно больше его диаметра $\frac{L}{d_B} \gg 1$.

Математическая модель нагрева цилиндрических заготовок в проходной печи в двухмерной постановке с учетом представления выражений, констант и переменных для расчетного программного пакета «FemLab Comsol Multiphysics» имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_1 \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_1 \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\rho_1 u \frac{\partial u}{\partial x} - \rho_1 v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial x}; \\ -\frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_1 \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta_1 \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\rho_1 u \frac{\partial v}{\partial x} - \rho_1 v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y}; \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \\ \nabla \cdot (-k_1 \nabla T_1) = \rho_1 c_{p1} T_1 \sqrt{u^2 + v^2}; \\ \delta_{is} \rho_2 c_{p2} \frac{\partial T_{2j}}{\partial t} + n \cdot (k_1 \nabla T_1 - k_2 \nabla T_{2j}) = h_j (T_1 - T_{2j}) + \sum_{i=3}^{l+2} \varepsilon_i \sigma (T_i^4 - T_{2j}^4); \\ (u, v) = (u(P), v(P)); \\ T_{2j, t=0} = T_{2j0} \quad T_1 = \text{const}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где t – независимая переменная (время); u, v – компоненты вектора скорости дымовых газов (определяются через мощность P горелок); ρ_2, c_{p2}, k_2 – плотность, теплоемкость и теплопроводность заготовок;

$$\eta_1 = 0,272 \cdot T_1^{0,7265} \cdot 10^{-6} \text{ (Пуаз)}, \rho_1 = 439,98 \cdot T_1^{-1,0319} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right), k_1 = 0,126 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right), c_{p1} = 1544 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$$

– динамическая вязкость, плотность, теплопроводность, теплоемкость дымовых газов;

h_j – коэффициент конвективной теплоотдачи от дымовых газов к j -й заготовке; T_1 – температура дымовых газов; T_{2j} – температура j -й заготовки;

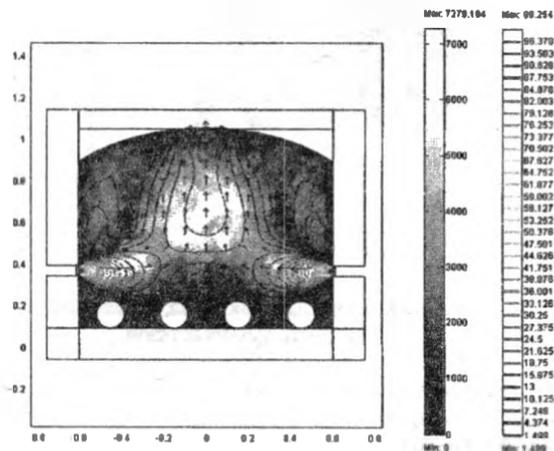
$\sum_{i=3}^{l+2} \epsilon_i \sigma (T_i^4 - T_{2j}^4)$ – сумма падающих потоков излучения на j -ю заготовку от всех объектов в количестве l , участвующих в теплообмене, с учетом переизлучения j -й заготовки.

При решении уравнений Навье-Стокса, входящих в систему (1), можно получить распределение чисел Рейнольдса и поля скоростей дымовых газов при заданном рабочем температурном режиме печи. Полученное поле скоростей учитывается при расчете конвективной составляющей теплового потока, передаваемого заготовкам.

Таким образом можно оценить вклад конвективной составляющей при различных конструктивных и технических параметрах проходной печи и тем самым определить оптимальные параметры технологии нагрева, что особенно важно при определении места расположения горелочных устройств.

С этой целью для совершенствования технологии тепловой обработки цилиндрических заготовок и снижения удельного расхода топлива в проходных нагревательных печах с помощью мультифизического расчетного программного пакета «Femlab Comsol Multiphysics» была разработана газодинамическая модель обтекания заготовок дымовыми газами в поперечном сечении проходной печи (конструктивные размеры печи аналогичны нагревательной печи ГНП-1 ПО «МАЗ»). На рисунках 1, 2 отображены стационарные поля скоростей и чисел Рейнольдса для дымовых газов при различных схемах удаления дымовых газов из рабочего пространства. При

детальном анализе рисунков 1, 2 можно сделать однозначный вывод об обоснованности проектирования и строительства проходных печей с удалением дымовых газов через щелевую конструкцию пода, по сравнению с существующей схемой удаления дымовых газов для печей машиностроительного производства через свод.

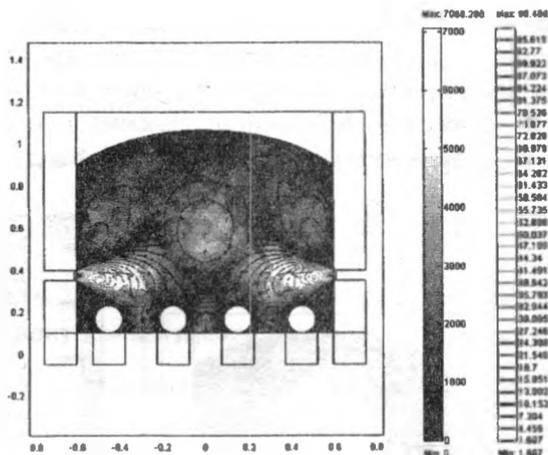


левая шкала – числа Рейнольдса; правая шкала – скорость дымовых газов

Рисунок 1 – Решение задачи газодинамики для сечения проходной печи при удалении дымовых газов через свод печи

При выбранном способе удаления дымовых газов необходимо решить следующую задачу: подбор конструктивных (высота установки боковых горелок h_B и характерный размер щели подины x_s) и технических (мощность горелок P) параметров печи, при которых нагрев заготовок диаметром d_B будет проходить в допустимом диапазоне интенсивностей температурных напряжений, возникающих в заготовке.

Для решения задачи определения интенсивностей температурных напряжений в j -й заготовке необходимо получить при решении системы (1) температурное распределение по ее сечению $T_{2j} = T_{2j}(r, \varphi)$. Для этой цели можно использовать любые доступные расчетные методы.



левая шкала – числа Рейнольдса; правая шкала –
 скорость дымовых газов

Рисунок 2 – Решение задачи газодинамики для сечения
 проходной печи при удалении дымовых газов
 через подину печи

Рассмотрим в качестве расчетных методов при решении поставленной задачи метод конечных элементов (МКЭ) и метод эквивалентных источников (МЭИ).

С точки зрения точности решения исходной задачи и объективного учета всех факторов целесообразно ее решать методом конечных элементов. Однако математическое моделирование и решение задачи с учетом многих технологических и конструктивных факторов не гарантирует быстрого и адекватного решения. Поскольку на этапе решения поставленной задачи в программном пакете «Femlab Comsol Multiphysics» могут возникать ошибки, не связанные с адекватностью постановки физической части задачи, а с установкой параметров решающего устройства, это значительно усложняет расчет.

С точки зрения простоты вычислений представляет интерес воспользоваться методом эквивалентных источников, однако этот метод оправдывает себя лишь при осесимметричном нагреве заготовок. Поэтому необходимо при конкретной постановке задачи обоснованно подходить к выбору того или иного метода решения.

С целью выбора метода решения был осуществлен расчетный эксперимент, в ходе которого была решена двухмерная задача нагрева цилиндра с помощью методов «МКЭ» и «МЭИ» при одинаковых начальных и граничных условиях третьего рода.

На рисунке 3 отображены температурные графики нагрева цилиндрической заготовки из стали марки 45, диаметром 130 мм в случаях расчета с помощью методов «МЭИ» или «МКЭ» при одинаковых начальных и граничных условиях (средняя температура по зонам печи 1250°C).

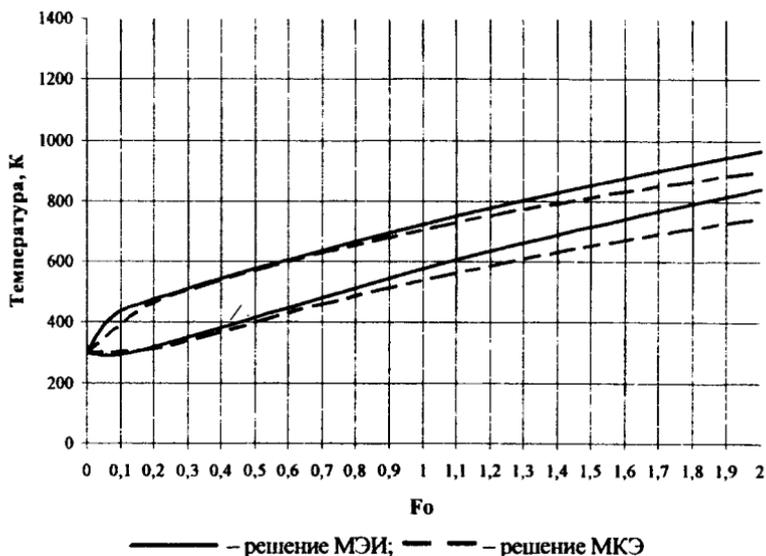


Рисунок 3 – Температурный график нагрева цилиндрической заготовки из стали марки 45, диаметром 130 мм в случаях расчета с помощью методов «МЭИ» и «МКЭ» при одинаковых граничных и начальных условиях

Из рисунка 3 видно, что результаты решений, полученных при использовании методов «МКЭ» и «МЭИ» практически идентичны в пределах чисел Фурье от 0 до 0,7. То есть в этих пределах можно обоснованно использовать метод «МЭИ» при решении данного типа задач вместо метода «МКЭ». В этих же пределах чисел Фурье на поверхности и в центре заготовки возникают максимальные температурные напряжения, которые при осесиммет-

ричном нагреве рассчитываются следующим образом:
радиальные температурные напряжения:

$$\sigma_r(r) = E \left[-\frac{1}{r^2(1-\nu)} \int_0^r \alpha T(x) x dx + A \right]; \quad (2)$$

тангенциальные температурные напряжения:

$$\sigma_\varphi(r) = E \left[-\frac{1}{r^2(1-\nu)} \int_0^r \alpha T(x) x dx - \frac{\alpha T(r)}{1-\nu} + A \right]; \quad (3)$$

осевые температурные напряжения:

$$\sigma_z(r) = E \left[-\frac{\alpha T(r)}{1-\nu} + 2A \right], \quad (4)$$

где $A = \frac{1}{R^2(1-\nu)} \int_0^R \alpha T(x) x dx$; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; α – коэффициент линейного расширения.

Интенсивность напряжений рассчитывается по формуле

$$\sigma_n(r) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left((\sigma_r(r) - \sigma_\varphi(r))^2 + (\sigma_\varphi(r) - \sigma_z(r))^2 + (\sigma_r(r) - \sigma_z(r))^2 \right)^{1/2}. \quad (5)$$

При нахождении времени нагрева заготовок применение метода «МЭИ» в качестве расчетного метода может привести к существенным погрешностям. В этом случае обосновано применение метода «МКЭ».

На рисунках 4 – 7 приведены зависимости от критерия Био интенсивностей растягивающих температурных напряжений, возникающих в центре цилиндрических заготовок из сталей

основных марок, используемых в кузнечно-штамповочном производстве на машиностроительных предприятиях.

Получена также неявная зависимость критерия Био (на основании численного решения уравнений Навье-Стокса) от конструктивных (высота установки горелок, характерный размер щели подины) и технических (мощность горелок) параметров печи, которую можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 Bi &= Bi(h_B, x_S, P) = \frac{\alpha_{cp} d_B}{2k_{2t=0}} = \\
 &= \frac{\rho_1 C_{p1} T_1 \sqrt{u^2 + v^2}}{T_1 - T_{2j\Pi_{t=t_k}}} \cdot \frac{d_B}{4k_{2t=0}}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

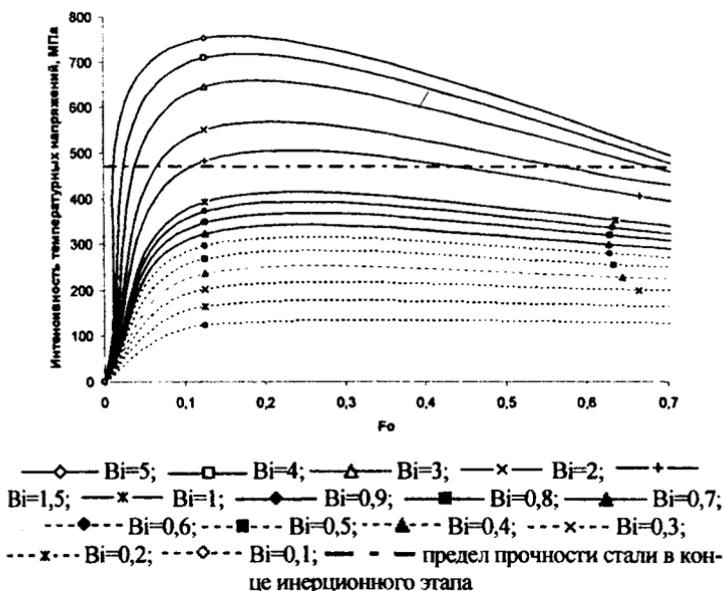
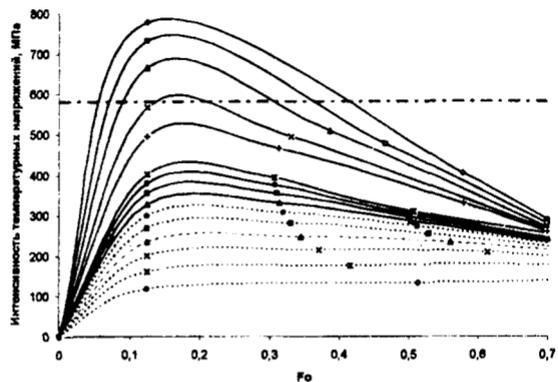
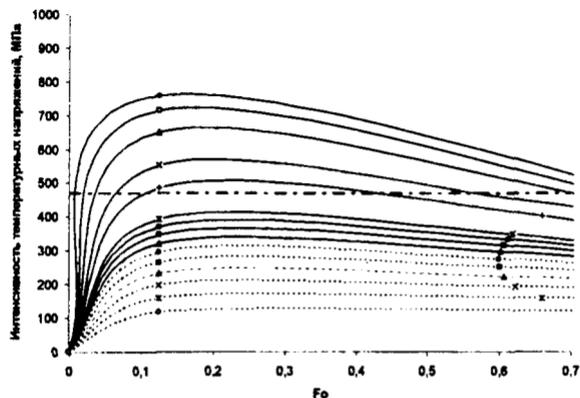


Рисунок 4 — Зависимость интенсивности температурных напряжений, возникающих в центре цилиндрической заготовки из стали марки 45 диаметром 130 мм, от критерия Био



—◇— Bi=5; —□— Bi=4; —△— Bi=3; —×— Bi=2;
 —+— Bi=1,5; —x— Bi=1; —◆— Bi=0,9; —■—
 Bi=0,8; —▲— Bi=0,7; —◆— Bi=0,6; —■— Bi=0,5;
 —▲— Bi=0,4; —x— Bi=0,3; —x— Bi=0,2; —◇—
 Bi=0,1;
 — - — предел прочности стали в конце инерционного
 этапа

Рисунок 5 – Зависимость интенсивности температурных напряжений, возникающих в центре цилиндрической заготовки из стали марки 40 диаметром 130 мм, от критерия Био



—◇— Bi=5; —□— Bi=4; —△— Bi=3; —×— Bi=2;
 —+— Bi=1,5; —x— Bi=1; —◆— Bi=0,9; —■—
 Bi=0,8; —▲— Bi=0,7; —◆— Bi=0,6; —■— Bi=0,5;
 —▲— Bi=0,4; —x— Bi=0,3; —x— Bi=0,2; —◇—
 Bi=0,1;
 / — - — предел прочности стали в конце инерционного
 этапа

Рисунок 6 – Зависимость интенсивности температурных напряжений, возникающих в центре цилиндрической заготовки из стали марки 35 диаметром 130 мм, от критерия Био

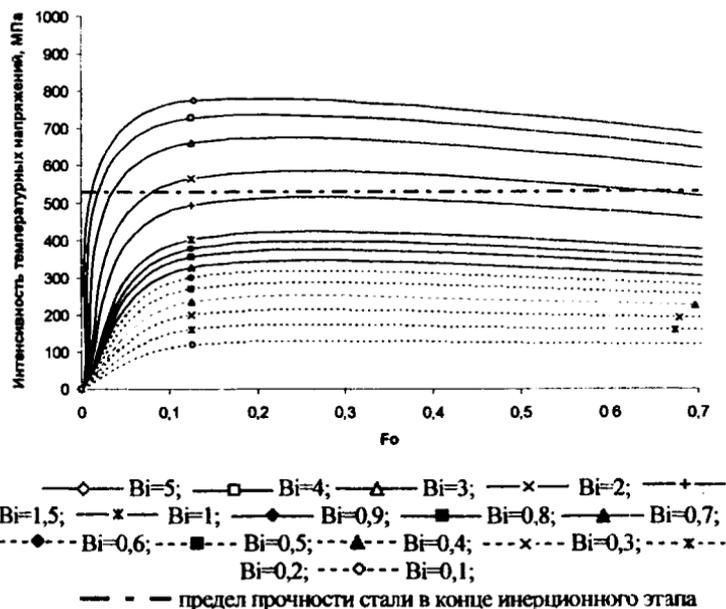


Рисунок 7 – Зависимость интенсивности температурных напряжений, возникающих в центре цилиндрической заготовки из стали марки 30 диаметром 130 мм, от критерия Био

Зависимости, отображенные на рисунках 4 – 7, неявно накладывают ограничения на конструкцию и технические параметры печи через критерий Био:

$$\sigma_{\text{и}} = \sigma_{\text{и}}(\text{Bi}) = \sigma_{\text{и}}(h_B, x_S, P). \quad (7)$$

Таким образом, подбор конструктивных и технических параметров проходной печи, базирующийся в выражениях (6) и (7), при многовариантных расчетах определяют как технологию качества нагрева заготовок, так и удельный расход топлива.