

A mathematical model and an algorithm of calculation of conjugated heat-exchange while heating metal castings in a pusher-type continuous furnace. The approach is formulated to the problem of calculation area quantization at setting forth conjugated problems of radiation-conductive heat exchange for geometric form heating furnaces.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, БГПА,
 В. И. ЗАВЕЛИОН, ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ
 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, И. А. ТРУСОВА, БГПА,
 О. В. ДУБИНА, ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ
 КОМБИНАТ "КРИВОРОЖСТАЛЬ",
 Э. О. ЦКТИШВИЛИ, П. Я. ЛАКТИОНОВ, АЛЧЕВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ

ЗАДАЧА СОПРЯЖЕННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНОГО БЛЮМА В МНОГОЗОННОЙ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ ТОЛКАТЕЛЬНОГО ТИПА СТАНА 600

УДК 621.783.321.1

В ранее опубликованных работах авторов приведены математические модели сопряженного теплообмена (внешнего и внутреннего) для ряда печей, функционирующих в условиях Белорусского металлургического завода [1—4]. Следует отметить уникальность каждой тепловой задачи, связанную со спецификой конструкции конкретной печи и условиями ее эксплуатации и тепловой работы.

Настоящая работа посвящена разработке математической модели нагрева металла в методической печи стана 600, эксплуатирующейся в условиях Алчевского металлургического комбината (АМК). Опираясь на ранее разработанные принципы построения математических моделей для печей иных конструкций [1—4], основное внимание уделим особенностям, характерным для анализа процесса нагрева металла в печи стана 600. Методическая печь данного типа характеризуется достаточно сложной геометрией верхнего и нижнего строений (рис. 1).

Трапециевидальная форма сварочных зон требует выработки специального подхода при дискретизации области печного пространства на расчетные зоны. Отметим, что предложенная в работе [5] замена трапециевидальной сварочной зоны на эквивалентную по объему прямоугольную является весьма серьезным упрощением, способным негативно повлиять на достоверность получаемых результатов. Вместе с тем непосредственный учет неклассической формы излучающих поверхностей приводит к принципиальному усложнению математической постановки рассматриваемой задачи [6, 7], что неприемлемо для практики. В настоящей работе для учета конструктивных особенностей печи предлагается своего рода промежуточный вариант. Его суть в следующем: наклонная линия трапеции, являющейся поперечным сечением каждой сварочной зоны, заменяется ломаной линией, состоящей из отрезков, сонаправленных с осями декартовой системы координат (рис. 2).

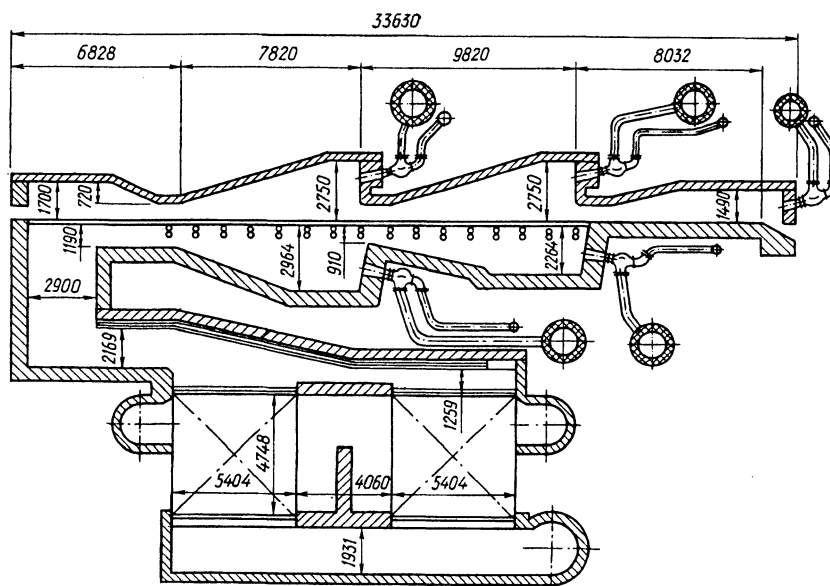


Рис. 1. Схема методической печи стана 600

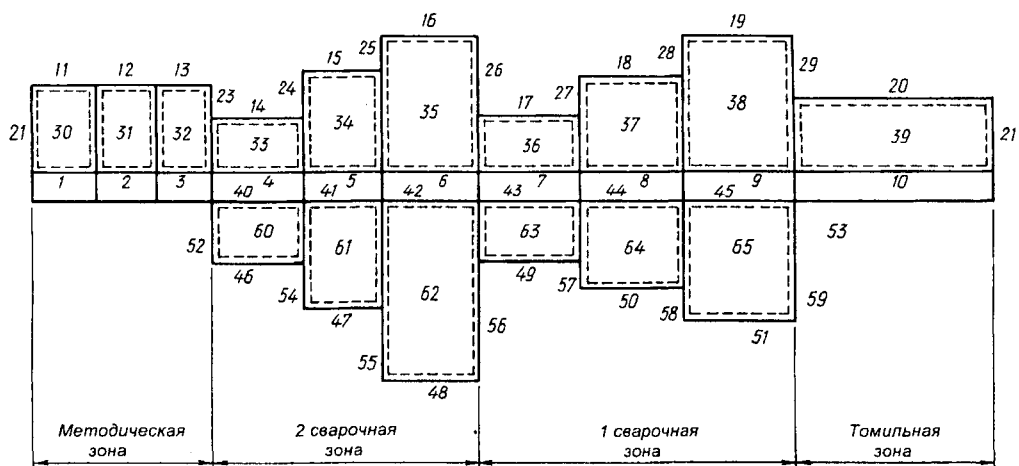


Рис. 2. Расчетная схема задачи нагрева металла в печи

Параметры такой замены определяются числом разбиений сварочных зон в осевом направлении, а также реальными габаритами печи. Вторая специфическая особенность конструкции рассматриваемой печи — геометрическая асимметрия в расположении технологических зон верхнего и нижнего строений: в первой и второй сварочных зонах имеет место двухсторонний нагрев, в то время как методическая и томильная зоны фактически являются односторонними. Это обстоятельство, на первый взгляд, упрощающее постановку задачи за счет сокращения расчетных зон, оказывает и негативное влияние на разработку вычислительного алгоритма. На этапе формулировки математической модели возникает проблема корректного задания условий теплообмена на нижней поверхности металла в методической и томильной зонах. Кроме того, несколько усложняется собственно вычислительная программа за счет асимметрии при разбивке и обработке расчетных зон для областей верхнего и нижнего строений печи.

При разбиении на зоны будем стремиться к их минимальному количеству при сохранении возможности учета всех основных особенностей теплообмена в печи. Томильная зона рассматривается как одна расчетная зона, поскольку здесь температура металла изменяется весьма незначительно. Каждая из остальных зон разбита в направлении движения металла на три расчетных участка. Такое разделение тракта печи на 10 расчетных участках (по три на методическую, первую и вторую сварочные зоны, один — томильная зона) представляется достаточным для учета динамики нагрева металла с приемлемой точностью.

Как видно из рис. 2, даже минимально допустимая дискретизация поверхностей металла, кладки и печного пространства, учитывающая конструктивные особенности рассматриваемой нагревательной печи, приводит к построению зональной модели теплообмена с 65 зонами (верхнее строение — 39 зон, нижнее строение — 26 зон). Таким образом, математическая модель сводится к решению сопряженной задачи лучисто-кондуктивного теплообме-

на для системы "верхнее строение печи, модельная полоса металла, нижнее строение печи". С учетом того, что любая задача лучистого теплообмена по своей природе является нелинейной и требует применения итерационных методов решения, использование последних позволяет одновременно решить и проблему увязки решений задач внешнего теплообмена для верхнего и нижнего строений печи. В целом задача требует совместного решения уравнений лучистого теплообмена для верхнего и нижнего строений печи и уравнения теплопроводности для полосы металла. Базисное решение задачи на одном итерационном шаге требует рассмотрения следующей совокупности уравнений [5]:

система уравнений для расчетных зон 2-го рода, где заданы тепловые потоки:

$$\sum_{k=1}^{N_2^{(H)}} \left(a_{ki}^{n(H)} T_k^{B(H)} + g_{ki}^{n(H)} T_k^{B(H)} \right) + g_i^{0^{n(H)}} + Q_i^{y^{n(H)}} = 0, \quad i \in N_2^{B(H)}; \quad (1)$$

формула для вычисления тепловых потоков на поверхностях металла (зоны 1-го рода)

$$Q_i^{B(H)} = \sum_{k=1}^{N_1^{(H)}} \left(a_{ki}^{B(H)} T_k^{B(H)} + g_{ki}^{n(H)} T_k^{B(H)} \right) + g_i^{0^{n(H)}}, \quad i \in N_1, \quad (2)$$

где N — общее число зон; N_1, N_2 — множества номеров зон 1-го, 2-го рода; $a_{ki}, g_{ki}, g_i^0, Q_i^y$ — коэффициенты радиационного (эффективные с учетом селективности излучения) и конвективного теплообмена, а также величины объемных тепловыделений; "в" и "н" — верхнее и нижнее строения печи.

Моделирование двухстороннего нагрева металла приводит к соответствующим изменениям. Формулировка внутренней задачи теплообмена примет следующий вид:

$$\text{ср} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \right), \quad i \in N_1, \quad (3)$$

где $t' = x/u (0 \leq x \leq L)$;

$$-\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=-\delta} = \frac{Q_i^H}{F_i}, \quad i \in N_1; \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = \frac{Q_i^B}{F_i}, \quad i \in N_1; \quad (5)$$

$$T_i \Big|_{t'=0} = T_{i-1} \Big|_{t'=L_{i-1}/u}, \quad i \in N_1. \quad (6)$$

Очевидно, что существенную техническую проблему при решении приведенной системы уравнений представляет вычисление коэффициентов радиационного и конвективного теплообмена в уравнении лучистого переноса (1). Эти коэффициенты учитывают геометрию расчетной области, а также схему ее дискретизации. При достаточно большом количестве расчетных зон задача рациональной дискретизации области с целью упрощения и автоматизации последующего расчета коэффициентов радиационного и конвективного теплообмена приобретает первостепенное значение. Представленная на рис. 2 расчетная область позволяет выделить характерный повторяющийся элемент (подобласть), изображенный на рис. 3. Данная подобласть соответствует в рамках принятой расчетной модели четырем технологическим зонам (первая и вторая, верхняя и нижняя сварочные зоны). Приведенная в алгебраическом виде на рис.3 нумерация расчетных зон, на которые разбивается характерная подобласть, позволяет с единых позиций на программном уровне подойти к вычислению коэффициентов уравнения (1) для каждой из четырех указанных выше технологических зон. Именно этим объясняется введение в области нижнего строения дополнительной расчетной зоны № 20, что обеспечивает идентичность первой нижней сварочной зоны прочим трапециевидальным зонам. Следует отметить, что после нахождения коэффициентов радиационного теплообмена для всех четырех сварочных зон аналогичные вычисления проводятся и для других технологических зон.

Вычислительный алгоритм рассматриваемой задачи следующий.

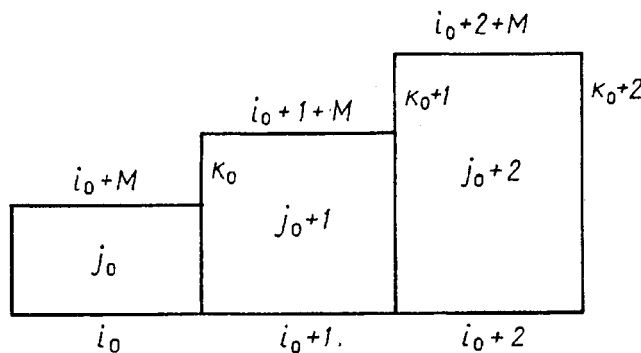


Рис.3. Дискретизация характерного элемента расчетной области

1. Задание входных параметров, определяющих специфику исследуемого теплотехнологического процесса (геометрия печи, габариты технологических зон, теплофизические характеристики топлива, воздуха, продуктов сгорания, металла, включая их зависимость от температуры, прочие параметры, вычисление которых не связано с температурой металла, кладки, печного пространства).

2. После предварительного задания температур граничных поверхностей металла для областей верхнего и нижнего строений печи решаются задачи внешнего теплообмена, т.е. последовательно решается уравнение (1), а затем по формуле (2) находят тепловые потоки на поверхности металла. Для решения системы (1) применяется итерационный метод Ньютона.

3. По найденным на поверхностях металла тепловым потокам определяем температурное поле по толщине заготовки. Граничные значения используются в качестве начального приближения при решении задачи внешнего теплообмена на следующем итерационном шаге (см. п. 2). Пересчет всех теплофизических, радиационных характеристик, зависит от температурного поля в исследуемой системе.

4. Проверка сходимости полученного решения для температур поверхностей металла с последующим переходом к п. 2, если заданный критерий точности не достигнут, или к п. 5 при его достижении.

5. Формирование на основе полученного температурного поля для заготовок металла массивов выходной информации, имеющей практический интерес, включая представление выходных параметров расчета в удобном для пользователя виде.

Приведенная математическая модель сопряженного теплообмена прошла параметрическую идентификацию по данным промышленного эксперимента, проведенного в условиях методической печи стана 600 АМК. Результаты сравнения расчетных и

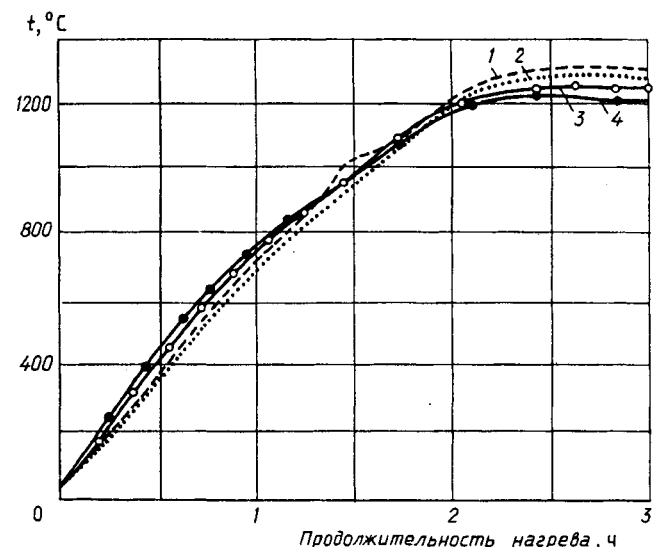


Рис. 4. Изменение температур верхней (1 — расчет; 3 — эксперимент) и нижней (2 — расчет; 4 — эксперимент) поверхностей заготовки при нагреве в методической печи

экспериментальных данных приведены на рис. 4, из которого следует удовлетворительная сходимость термограмм.

Таким образом, разработанная математическая модель (в сопряженной постановке) нагрева металла в методической печи может быть использована для исследования и разработки рациональных температурно-тепловых режимов с целью повышения производительности и снижения топливопотребления.

Литература

1. Завелион В. И., Вайс Р. Б., Трусова И. А. и др. Математическое моделирование нагрева заготовок в печи с шагающими балками (сопряженная постановка) // Изв. вузов. Энергетика. 1993. № 1—2. С. 113—117.
2. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Навука і тэхніка, 1995.
3. Завелион В. И., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. и др. Сопряженная задача нагрева металла в печи стана 850 // ИФЖ. 1995. Т. 68, №4.
4. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Петух П. П. и др. Исследование технологии нагрева непрерывнолитых заготовок высокоуглеродистых сталей в печах с шагающими балками // Сталь. 1995. № 4.
5. Арутюнов В. А., Бухтияров В. В., Крупенников. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990.
6. Андрианов В. Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. М.: Энергия, 1972.
7. Оцисик М. Н. Сложный теплообмен. М.: Мир, 1976.