

- давление воды — 0,3–0,4 МПа;
- расход воды на 3 электрода — 3 м³/ч;
- давление сжатого воздуха — 0,2–0,4 МПа;
- расход сжатого воздуха на 3 электрода — 500–700 м³/ч.

Полностью водоохлаждаемый свод с экономайзерами новой модификации установлен на ДСП-100НЗА ОАО «Донецкий металлургический завод» в апреле 2000 г.

Промышленные испытания свода показали высокую эффективность и надежность всех элементов конструкции. Анализ показателей проведенных 600 плавов подтвердил правильность принятых решений при разработке свода: расход электродов снизился на 16%, а потери тепла при охлаждении свода — на 10%.

Система отличается простотой конструкции и возможностью поддержания стабильных параметров охлаждения. Применение газодинамических уплотнителей практически исключает пылегазовые выбросы через электродные зазоры, снижает загрязнение воздушной среды в цехе, тем самым способствует улучшению условий труда персонала печи и условий работы элементов свода. Кроме того, подавление высокотемпературных пылегазовых выбросов позволяет уменьшить нагрев и окисление графитированных электродов.

Список литературы

1. Торшин А.М., Коломота В.Н. Модернизация дуговой сталеплавильной печи ДСП-100НЗА ОАО «Донецкий металлургический завод» // Наукові праці ДонДТУ. Металургія Випуск 18, 2000. — С. 41–43.
2. Торшин А.М., Коломота В.Н. Полностью водоохлаждаемый свод 100-т дуговой сталеплавильной печи с центральной съемной частью и газодинамическими уплотнителями электродов // Наукові праці ДонДТУ. Металургія. Випуск 14, 1999. — С. 148–149.
3. Киселев А.Д., Комаров П.Н., Устюгов А.А., Крушинский М.М. Конструктивные и аэродинамические параметры газодинамических уплотнителей электродных отверстий крупнотоннажных ДСП // Сб. Повышение эффективности работы дуговых сталеплавильных печей. — М.: Металлургия, 1983. — С. 20–24.

© Торшин А.М., Коломота В.Н., Литвиненко К.Н., 2001

ВОЛКОВА О.Г., КУРБАТОВ Ю.Л. (ДОНДТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ САДКИ НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ В ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Представлена математическая модель расчета температурного поля тела неправильной формы методом конечных элементов. Получено экспериментальное подтверждение адекватности математической модели. На основе математического моделирования теплового состояния металла предложен режим термической обработки, позволяющий снизить расход природного газа.

В туннельной печи противоблоксной обработки стали производят нагрев и охлаждение заготовок, представляющих собой сплошной цилиндр длиной 2 м и диаметром 180 мм. Сформированные из нескольких десятков заготовок пакеты транспортируют по рабочему пространству печи с помощью тележек. С целью обеспечения достаточного качества противоблоксной обработки металл проходит 4 технологические зоны печи: технологическое охлаждение, нагрев, выдержку и охлаждение перед разгрузкой. В каждой зоне поддерживается определенный температурный режим. Печь отапливается природным газом. Охлаждение производится атмосферным воздухом.

Как показала практика работы печи, «узким» местом является охлаждение металла после печи на воздухе перед разгрузкой. С целью увеличения длины зоны охлаждения перед разгрузкой предложено [1] несколько последних мест из зоны выдержки передать в зону охлаждения. Для того, чтобы определить количество мест, передаваемых в зону охлаждения перед разгрузкой, необходимо произвести анализ температурного поля в зонах технологического охлаждения, нагрева, выдержки, предварительного охлаждения перед разгрузкой и зоне окончательного охлаждения. Анализ температурного поля выполняли путем математического моделирования температурного поля.

Математическое моделирование проводили с помощью численных методов: метода конечных разностей (МКР) и метода конечных элементов (МКЭ). Сложность расчета поля температур по сечению пакета заключается в том, что пакет заготовок представляет собой тело неправильной формы и в процессе обработки металла меняются граничные условия и теплофизические свойства (теплоемкость, плотность, теплопроводность). В связи с этим использование аналитического метода, позволяющего получить точное решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, неприемлемо.

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$c(t) \cdot \rho(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial y} \right],$$

где $x, y \in G$, G — двумерная область с границей Γ .

Начальные условия:

$$t(x, y, 0) = f(x, y).$$

Граничные условия третьего рода:

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha(t) \cdot (t_s - t_{cp}),$$

где: α — коэффициент теплоотдачи.

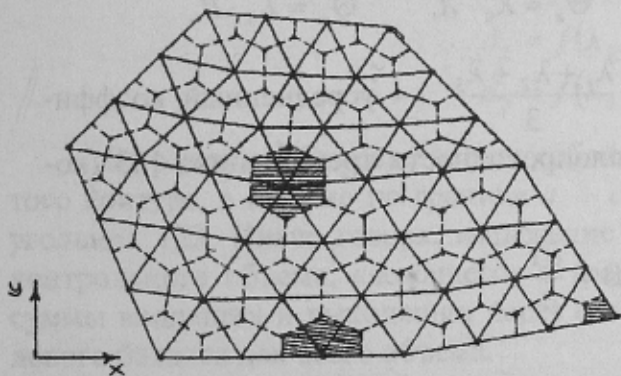


Рис. 1. Область расчета тела неправильной формы и ее дискретизация на треугольные элементы и контрольные объемы

элементов, обращающих данный контрольный объем в интегральный баланс для объема в целом. В нестационарном состоянии в каждой узловой точке происходит не только подвод или отвод тепла, но и изменение внутренней энергии. Узловая точка i может быть внутренней (рис. 2, а) или граничной (рис. 2, б, в). Неизвестная температура определялась из уравнения теплового баланса для каждого контрольного объема отрезка единичной длины области за время $\Delta\tau$:

$$\Delta\tau \cdot \oint \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot d\ell = (T_i^{k+1} - T_i^k) \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot \sum_{j=1}^N V_j, \quad (1)$$

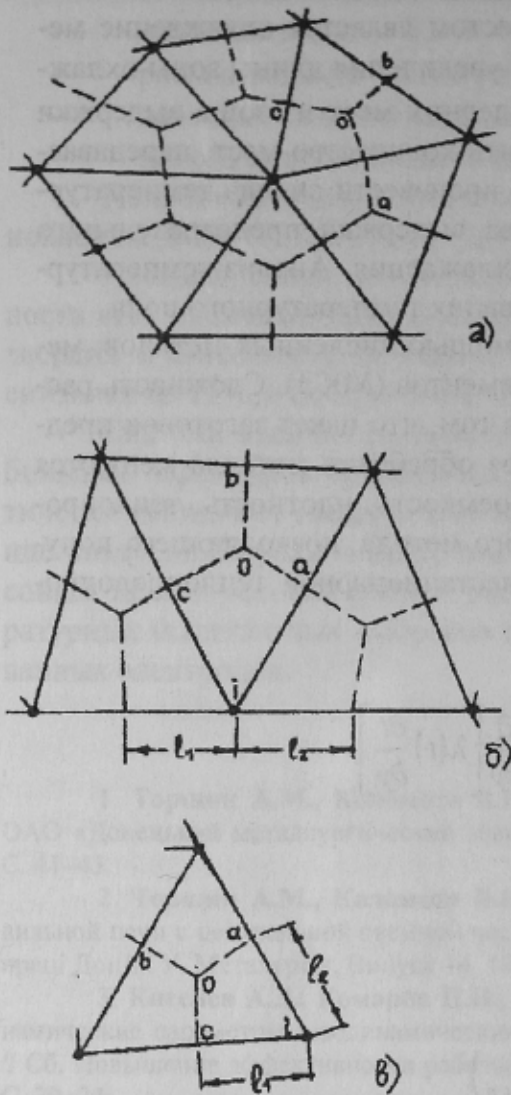


Рис. 2. Построение контрольного объема с внутренней узловой точкой (а), граничной узловой точкой с тремя соседними элементами (б), граничной узловой точкой с одним соседним элементом (в)

коэффициент теплопроводности в точке O).

$$A = \frac{\partial T}{\partial x}; \quad B = \frac{\partial T}{\partial y}.$$

Тогда уравнение (1) приобретает вид:

$$\int_a^c (\Theta_x dy - \Theta_y dx) = \int_a^c \Theta_x dy - \int_a^c \Theta_y dx = \lambda_0 \cdot A(y_c - y_a) - \lambda_0 \cdot B(x_c - x_a), \quad (3)$$

где x_c, y_c, x_a, y_a — соответственно координаты точек c и a .

Для расчета тепловых потоков, входящих и выходящих из контрольного объема, применяются обычные функции формы, описывающие изменение независимой переменной на элементе. В данном случае полином представляет собой функцию формы для двухмерного треугольного элемента и имеет вид:

$$T = Ax + By + C. \quad (4)$$

где в левой части — интеграл по замкнутому контуру — сумма всех входящих и выходящих тепловых потоков (Θ) для данного контрольного объема; в правой части уравнения отражено изменение внутренней энергии контрольного объема за время $\Delta\tau$; T_i — температура центральной узловой точки; k — шаг по времени; c_i — теплоемкость контрольного объема; ρ_i — плотность контрольного объема, $\sum_{j=1}^N V_j$ — сумма

всех частей контрольного объема, входящих в составляющие контрольный объем треугольники; N — число треугольных элементов, образующих контрольный объем.

Для отдельно взятого треугольного элемента 123 (рис. 3) интеграл по замкнутому контуру при обходе против часовой стрелки имеет вид:

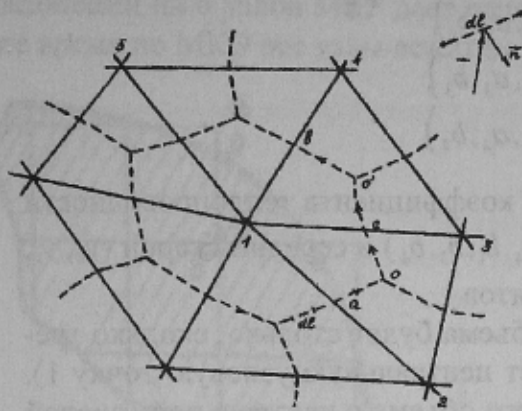
$$\oint \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot dl = \int_a^c (\Theta_x dy - \Theta_y dx), \quad (2)$$

где Θ_x, Θ_y — проекции вектора теплового потока в прямоугольной системе координат; \vec{n} — нормаль к элементарному отрезку dl по границе контрольного объема; dx, dy — проекции элементарного отрезка dl .

Проекции вектора теплового потока представим в виде:

$$\Theta_x = \lambda_0 \cdot A, \quad \Theta_y = \lambda_0 \cdot B,$$

где $\lambda_0 = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3}$ — усредненный коэффициент теплопроводности треугольника 123 (ко-



Для нахождения неизвестных коэффициентов A, B, C воспользуемся начальными условиями, когда предполагается, что в начальный момент задано распределение температур по всей области. Тогда, составив систему уравнений в соответствии с (4):

$$\begin{cases} T_1 = Ax_1 + By_1 + C; \\ T_2 = Ax_2 + By_2 + C; \\ T_3 = Ax_3 + By_3 + C. \end{cases}$$

Рис. 3. Отдельно взятый контрольный объем получим значения коэффициентов A, B, C :

$$\begin{cases} A = T_1 a_1 + T_2 a_2 + T_3 a_3; \\ B = T_1 b_1 + T_2 b_2 + T_3 b_3; \\ C = T_1 c_1 + T_2 c_2 + T_3 c_3. \end{cases}$$

где a, b, c — некоторые коэффициенты, зависящие от координат узлов 1, 2, 3.

Подставив найденные значения коэффициентов в (3), получим:

$$\int_a^c \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot d\ell = \int_a^c (\Theta_x dy - \Theta_y dx) = \lambda_0 (y_c - y_a) [T_1 \cdot a_1 + (T_2 \cdot a_2 + T_3 \cdot a_3)] - \lambda_0 (x_c - x_a) [T_1 \cdot b_1 + (T_2 \cdot b_2 + T_3 \cdot b_3)] \quad (5)$$

После преобразований уравнение (5) можно записать:

$$\int_a^c \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot d\ell = T_1 d_1 + (T_2 d_2 + T_3 d_3), \quad (6)$$

где:

$$\begin{aligned} d_1 &= f(\lambda_0, y_c, y_a, x_c, x_a, a_1, b_1), \\ d_2 &= f(\lambda_0, y_c, y_a, x_c, x_a, a_2, b_2), \\ d_3 &= f(\lambda_0, y_c, y_a, x_c, x_a, a_3, b_3). \end{aligned}$$

Выражение (6) представляет собой интеграл тепловых потоков по части замкнутого контура, а именно по границе $a - c$ контрольного объема, приходящейся на треугольник 123. Иначе говоря, выражение (6) количественно определяет вклад «куска» контрольного объема, «лежащего» в треугольнике 123, зависящий от алгебраической суммы входящих и выходящих через его границу тепловых потоков, в уравнение теплового баланса для всего объема.

Если продолжить обход против часовой стрелки по контуру, то для следующего «куска» общего контрольного объема, «лежащего» в треугольнике 134, интеграл по контуру запишется так:

$$\int \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot d\ell = \int (\Theta_x dy - \Theta_y dx) = \lambda_0 \cdot A (y_b - y_c) - \lambda_0 \cdot B (x_b - x_c). \quad (7)$$

Проводя аналогичные треугольнику 123 вычисления и преобразования для треугольника 134, выражение (6) в конечном счете примет вид:

$$\int_c^b \vec{\Theta} \cdot \vec{n} \cdot d\ell = T_1 \cdot d'_1 + (T_3 \cdot d_3 + T_4 \cdot d_4), \quad (8)$$

где d'_1, d_3, d_4 — соответствующие коэффициенты при температурах T_1, T_3, T_4 . Причем:

$$\begin{aligned} d'_1 &= f(\lambda_{0'}, y_b, y_c, x_b, x_c, a'_1, b'_1) \\ d'_3 &= f(\lambda_{0'}, y_b, y_c, x_b, x_c, a_3, b_3) \\ d'_4 &= f(\lambda_{0'}, y_b, y_c, x_b, x_c, a_4, b_4) \end{aligned}$$

т.е. коэффициенты зависят от усредненного значения коэффициента теплопроводности в точке O' , координат вершин (коэффициенты $a'_1, a_3, a_4, b'_1, b_3, b_4$) и середин сторон (y_b, y_c, x_b, x_c) следующего и предыдущего треугольных элементов.

Таких уравнений для «кусков» контрольного объема будет столько, сколько треугольников составляют контрольный объем (окружает центральную узловую точку 1). Сравнив выражение (6) и (8), для данного контрольного объема с центральной узловой точкой 1 левую часть уравнения (2) можно представить в виде:

$$\oint \bar{\Theta} \cdot \bar{n} \cdot d\ell = T_1 \sum_{j=1}^N d_1^j + \sum_{j=1}^N T_s^j \cdot d_s^j,$$

где T_1 — температура в центральной узловой точке данного контрольного объема; d_1^j — соответствующие коэффициенты при температуре T_1 в каждом из N треугольников-соседей, окружающих центральный узел 1; $\sum_{j=1}^N T_s^j \cdot d_s^j$ — сумма произведений температур в узлах треугольников-соседей на соответствующие каждому треугольному элементу коэффициенты d (индекс «s» обозначает «сосед»).

Выражение теплового баланса для конкретного контрольного объема вокруг центрального узла 1 имеет вид:

$$T_1^{k+1} \sum_{j=1}^N d_{1(j)}^k + \sum_{j=1}^N T_{s(j)}^k \cdot d_{s(j)}^k = (T_1^{k+1} - T_1^k) \cdot c_1^k \cdot \rho_1^k \sum_{j=1}^N V_j / \Delta\tau. \quad (9)$$

Решая уравнение (9) относительно неизвестной температуры T_1^{k+1} , определяется температура в центральном узле конкретного контрольного объема (являющимся одновременно одним из текущих узлов всей области) в новый момент времени.

Для контрольных объемов с центральной узловой точкой, лежащей на границе (рис. 2, б, в), уравнение теплового баланса имеет вид:

$$T_i^{k+1} \sum_{j=1}^N d_{i(j)}^k + \sum_{j=1}^N T_{s(j)}^k \cdot d_{s(j)}^k = (T_i^{k+1} - T_i^k) \cdot c_i^k \cdot \rho_i^k \sum_{j=1}^N V_j / \Delta\tau \pm q_i,$$

где $q_i = \alpha_i (T_i^k - T_{cp})$, Вт/м² — тепловой поток на границе контрольного объема при граничных условиях 3 рода, T_{cp} — температура среды, К.

Аналогичным образом составлены уравнения тепловых балансов для каждого контрольного объема области, которые решены относительно неизвестной температуры в центральной точке, представляющей собой текущий узел, на новом шаге по времени.

Перед использованием данной модели в технологических расчетах была проведена ее количественная и качественная оценка для установления адекватности модели реальному процессу изменения температуры металла в зоне технологического охлаждения.

Точность разработанной методики оценивалась сравнением температурного состояния цилиндрической заготовки диаметром 180 мм, определяемого по предлагаемому алгоритму (МКЭ), МКР и аналитическим методом.

Аппроксимация двухмерной области криволинейной границы координатной сеткой в МКР и МКЭ представлена на рис. 4. Сравнение двух методов показывает, что при

разбиении на 6 узлов МКР дает выпуклую границу (выступ) и вогнутую (впадина), в то же время по МКЭ все узлы лежат на криволинейной поверхности.

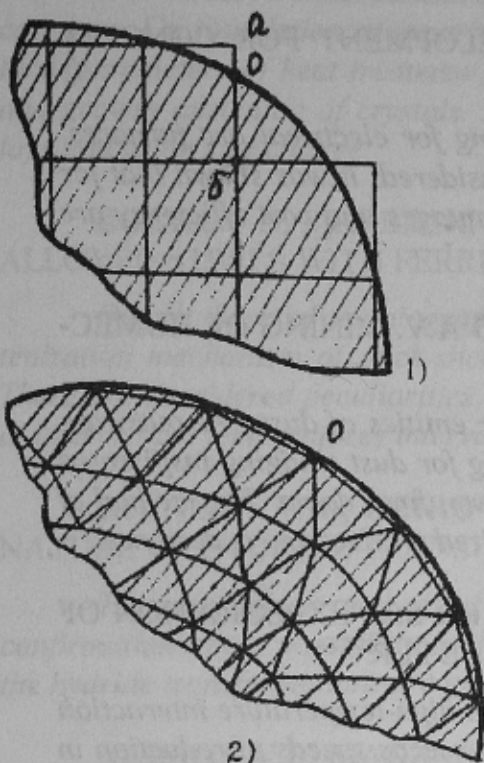


Рис. 4. Аппроксимация криволинейной границы координатной сеткой в МКР (1) и МКЭ (2): *a* — выпуклая граница («выступ»); *b* — вогнутая граница («впадина»); *o* — поверхность

Расхождение в определении температур по предлагаемой методике и аналитическим методом, принятым за эталонный в случае постоянства теплофизических свойств и граничных условий, составляет 1–1,5%. При определении температуры поверхности на прямоугольной сетке по МКР и аналитическим методом расхождение, установленное сравнительным анализом, достигает величин 25–31%. Особую трудность при пользовании МКР представляет нахождение координат и температуры точки поверхности, находящейся на отрезке координатной сетки между выпуклой и вогнутой границей (см. рис.4).

Экспериментальные исследования процесса технологического охлаждения пакета заготовок [2] подтвердили адекватность разработанной модели.

На основе математического моделирования теплового состояния металла рассчитан режим технологического охлаждения, нагрева, выдержки и охлаждения перед разгрузкой, что позволило перераспределить функции отдельных зон с целью увеличения времени охлаждения металла перед разгрузкой.

Таким образом, для увеличения продолжительности последнего периода предложено перевести две последние зоны регулирования теплового режима в режим охлаждения. При этом вместо топлива в зоны подается холодный воздух для охлаждения садки. Это позволило уменьшить расход природного газа на печь в количестве 190–200 м³/час. Экономический эффект только от экономии топлива составил около 95 тыс. у.е.

На основе математического моделирования получено распределение поля температур заготовок по всем зонам и определено, что количество зон предварительного охлаждения перед разгрузкой занимает две последние зоны, в которых размещается 4 тележки.

Список литературы

1. Курбатов Ю.Л., Владимирова Л.Ю., Яковенко А.Т. и др. Разработка оптимальных способов отопления туннельной печи для противофлюксовой обработки стали // *Сталь*, 1984. — № 9. — С. 87–89.
2. Курбатов Ю.Л., Уманский А.Г., Яковенко А.Т. и др. Экспериментальное исследование температуры металла в туннельной печи для противофлюксовой обработки стали. — Деп. в УкрНИИТИ, № 6(152) от 20.02.84.

© Волкова О.Г., Курбатов Ю.Л., 2001