

Введение. Местный нагрев металлических изделий является прогрессивным технологическим процессом, находящим широкое применение, например, при термообработке крупногабаритных сборных изделий [1], отпуске электродов электрошлакового переплава [2] и т.п. Применение местного нагрева вместо традиционного общепечного нагрева позволяет существенно сократить расход энергии, что весьма актуально в современных условиях хозяйствования. При проектировании нагревательных устройств для местной термообработки сварных изделий возникает необходимость определения рациональных конструктивных и режимных параметров, что требует исследования теплового состояния обрабатываемых изделий.

Вопросы оценки теплового состояния изделий при местном нагреве рассматривались в работах многих отечественных и зарубежных ученых, которые исполь-

зовали аналитические [3-5] и численные [6-7] методы для расчета температурных полей и оптимизации режимных параметров [8-9] для тел классической формы (пластина, цилиндр, параллелепипед). В то же время реальные изделия, подвергаемые местному нагреву, отличаются большей сложностью геометрических форм, что требует дальнейшего развития исследований, в частности, разработки алгоритмов расчета температурных полей с максимальным учетом особенностей конкретных изделий. В данной работе рассматривается задача о местном отпуске электрода ЭШП, состоящего из двух цилиндров разных диаметров.

Постановка задачи. Особенностью процесса местного нагрева электродов ЭШП является сложная геометрия изделий в зоне подвода теплоты. Один из вариантов такой геометрии представлен на рис. 1.

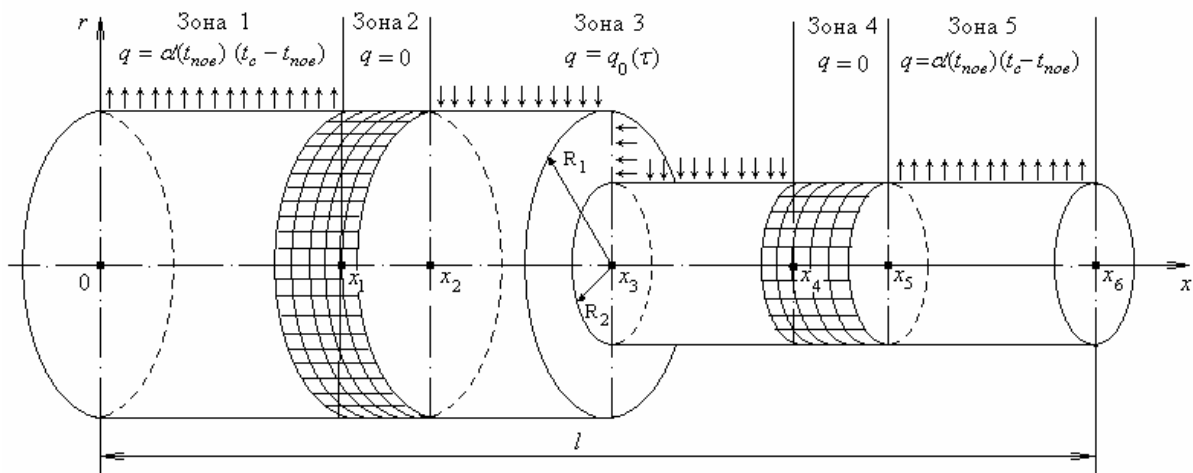


Рис. 1. Схема изделия переменного сечения

По условиям теплообмена можно выделить несколько зон: зоны 1,5 – зоны теплового воздействия, в которых происходит лучисто-конвективный теплообмен с окружающей средой; зоны 2,4 - зоны изоляции; зона 3 - зона подвода теплоты. Теплоотдачей с торцов изделия, находящихся вне устройства, можно пренебречь. По всей поверхности изделия имеет место симметрия по координате φ , в силу чего задача теплопроводности может быть сведена к двумерной.

Математическая модель внутреннего теплообмена имеет вид:

$$c_v(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(t) r \frac{\partial t}{\partial r} \right], \quad (1)$$

$$t(x, r, 0) = t_0(x, r), \quad (2)$$

$$\frac{\partial t(x, 0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial t(0, r, \tau)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial t(x, r, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=x_6} = 0, \quad (4)$$

$$\lambda(t) \frac{\partial t(x, r, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=x_3, R_2 < r < R_1} = q_0(\tau), \quad (5)$$

$$\lambda(t) \frac{\partial t(x, R_1, \tau)}{\partial r} \Big|_{0 < x < x_3} = q_1(x, \tau), \quad (6)$$

$$\lambda(t) \frac{\partial t(x, R_2, \tau)}{\partial r} \Big|_{x_3 < x < x_6} = q_1(x, \tau),$$

$$q_1(x, \tau) = \begin{cases} \alpha(t) \cdot (t_c - t(x, R_1, \tau)) & 0 < x \leq x_1 \\ 0 & x_1 < x \leq x_2 \\ q_0(\tau) & x_2 < x \leq x_4 \\ 0 & x_4 < x \leq x_5 \\ \alpha(t) \cdot (t_c - t(x, R_2, \tau)) & x_5 < x \leq x_6 \end{cases} \quad (7)$$

$$\alpha(t) = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon_m \left[(t_n + 273)^3 + (t_n + 273)^2 \cdot (t_c + 273) + (t_n + 273) \cdot (t_c + 273)^2 + (t_c + 273)^3 \right] + 2,55 \cdot \sqrt{t_n - t_c}, \quad (8)$$

где t_c – температура охлаждающей среды, °C; t_n – температура поверхности изделия, °C; ε_m – степень черноты тела.

Как видно, модель является нелинейной, поскольку учитывает зависимость теплофизических свойств металла и коэффициентов теплоотдачи от температуры. К тому же имеет место различный характер теплообмена на разных участках деталей, что делает затруднительным применение аналитических методов для решения данной задачи. Более целесообразным следует признать разработку численного алгоритма расчета температурных полей, основанного на универсальных конечно-разностных схемах.

Результаты. Для решения краевой задачи (1)–(8) применим локально-одномерный метод с привлечением для вывода разностных соотношений в граничных точках модифицированного метода элементарных тепловых балансов [10]. Схема разбивки исследуемой области на расчетные элементы с указанием основных типов расчетных точек приведена на рис. 2.

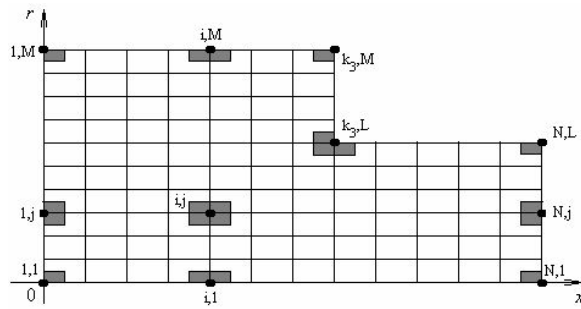


Рис. 2. Схема разбивки изделия на расчетные элементы

Сущность локально-одномерного метода в применении к двумерным задачам заключается во введении половинного шага по времени $\tau_{n+\frac{1}{2}}$ и последовательном решении на каждом временном слое одномерных уравнений теплопроводности. При этом начальные условия берутся на предыдущем полушаге. Решение соответствующих разностных уравнений получаем по методу прогонки.

Введем разностную сетку $T(x_i = i \cdot \Delta x; r_j = j \cdot \Delta r; \tau_n = n \cdot \Delta \tau; i = 0, 1, 2, \dots, N_i;$

$$j = 0, 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, S; \Delta x = \frac{l}{N}; \Delta r = \frac{R}{M}; \Delta \tau = \frac{\tau}{S}.$$

Пусть $t_{i,j}^n$ – значение температуры, а $\lambda_{i,j}$ и $Cv_{i,j}$ – значения коэффициентов теплопроводности и объемной теплоемкости металла в точке (x_i, r_j) в момент времени τ_n . Запишем расчетные уравнения для решения задачи (1)–(8) по каждому направлению.

По направлению x имеет место система алгебраических уравнений

$$A_{i,j} t_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j} t_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + B_{i,j} t_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = -F_{i,j}; \quad (9)$$

$$i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, L;$$

$$i = 1, 2, \dots, k_3; j = 1, 2, \dots, M.$$

Наиболее сложным представляется вывод расчетных коэффициентов $A_{i,j}, B_{i,j}, C_{i,j}, F_{i,j}$ для точки (k_3, L) . При этом к заштрихованной поверхности элементарного объема (рис.3.а) подводится тепловой поток q_0 , к остальным поверхностям – тепловые потоки, определяемые законом Фурье.

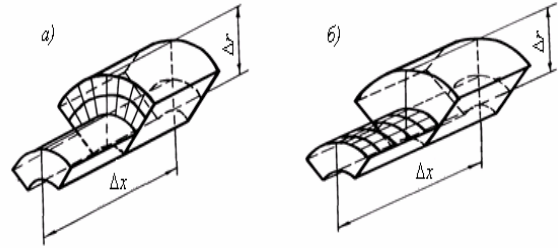


Рис. 3. Расчетный элемент в области сварного шва

Количество теплоты, входящее в расчетный элемент за время $\Delta \tau$ со стороны более массивной части

$$Q_1 = -\frac{\lambda_{k_3-1,L} + \lambda_{k_3,L}}{2} \cdot \frac{t_{k_3,L}^{n+\frac{1}{2}} - t_{k_3-1,L}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \cdot \Delta \tau \cdot \Delta S_1, \quad (10)$$

со стороны менее массивной части

$$Q_2 = \frac{\lambda_{k_3,L} + \lambda_{k_3+1,L}}{2} \cdot \frac{t_{k_3+1,L}^{n+\frac{1}{2}} - t_{k_3,L}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \Delta \tau \Delta S_2 + q_0^n \Delta \tau (\Delta S_1 - \Delta S_2). \quad (11)$$

При этом увеличение энтальпии расчетного элемента

$$\Delta W = Cv_{k_3,L} (t_{k_3,L}^{n+\frac{1}{2}} - t_{k_3,L}^n) \cdot \Delta V. \quad (12)$$

Учитывая, что центральный угол φ определяет сектор площадью $\frac{r^2 \cdot \varphi}{2}$, площади граней равны

$$\Delta S_1 = \left(r_L + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \frac{\Delta \varphi}{2} - \left(r_L - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \frac{\Delta \varphi}{2} = (L-1) \Delta r^2 \Delta \varphi, \quad (13)$$

$$\Delta S_2 = r_L^2 \frac{\Delta \varphi}{2} - \left(r_L - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \frac{\Delta \varphi}{2} = \left(L - \frac{5}{4} \right) \frac{\Delta r^2 \Delta \varphi}{2},$$

а объем элемента

$$\Delta V = \Delta S_1 \frac{\Delta x}{2} + \Delta S_2 \frac{\Delta x}{2} = \frac{12(L-1)-1}{16} \Delta r^2 \cdot \Delta \varphi \cdot \Delta x \quad (14)$$

Выполняя равенство $Q_1 + Q_2 = \Delta W$ и учитывая (10)–(14), получим

$$-\frac{\lambda_{k_3-\frac{1}{2},L} \Delta \tau \Delta r^2 \Delta \varphi (L-1)}{\Delta x} (t_{k_3,L}^{n+\frac{1}{2}} - t_{k_3-1,L}^{n+\frac{1}{2}}) + \frac{q_0^n \Delta \tau \Delta r^2 \Delta \varphi (L - \frac{3}{4})}{2} +$$

$$+ \frac{\lambda_{k_3+\frac{1}{2},L} \Delta \tau \Delta r^2 \Delta \varphi (L - \frac{5}{4})}{2 \Delta x} (t_{k_3+1,L}^{n+\frac{1}{2}} - t_{k_3,L}^{n+\frac{1}{2}}) = Cv_{k_3,L} (t_{k_3,L}^{n+\frac{1}{2}} - t_{k_3,L}^n) \times$$

$$\times \frac{12(L-1)-1}{16} \Delta r^2 \Delta x \Delta \varphi,$$

где $\lambda_{k_3-\frac{1}{2},L} = \frac{\lambda_{k_3,L} + \lambda_{k_3-1,L}}{2}$, $\lambda_{k_3+\frac{1}{2},L} = \frac{\lambda_{k_3,L} + \lambda_{k_3+1,L}}{2}$.

Приводя последнее уравнение к виду (9), получим

$$\begin{aligned}
A_{k_3,L} &= \frac{\lambda_{k_3-\frac{1}{2},L} \cdot \Delta\tau}{Cv_{k_3,L} \cdot \Delta x^2} \cdot \frac{16(L-1)}{12(L-1)-1}, \\
B_{k_3,L} &= \frac{\lambda_{k_3+\frac{1}{2},L} \cdot \Delta\tau}{Cv_{k_3,L} \cdot \Delta x^2} \cdot \frac{8(L-1)-2}{12(L-1)-1}, \\
C_{k_3,L} &= 1 + A_{k_3,L} + B_{k_3,L}, \\
F_{k_3,L} &= t_{k_3,L}^n + \frac{q_0^n \cdot \Delta\tau}{Cv_{k_3,L} \cdot \Delta x} \cdot \frac{8(L-1)+2}{12(L-1)-1}.
\end{aligned} \quad (15)$$

Для других типов точек вывод коэффициентов аналогичен. Опуская промежуточные выкладки, запишем значения коэффициентов

$$A_{i,j} = \begin{cases} 0, i=1; j=1,2,\dots,M, \\ 2\bar{A}_{i,j}, i=N; j=1,2,\dots,L; i=k_3; j=L+1, L+2,\dots,M, \\ \frac{16(L-1)}{12(L-1)-1} \bar{A}_{i,j}; i=k_3; j=L \\ \bar{A}_{i,j}, \text{ для всех остальных точек;} \end{cases} \quad (16)$$

$$B_{i,j} = \begin{cases} 0, i=N; j=1,2,\dots,L; i=k_3; j=L+1, L+2,\dots,M, \\ 2\bar{B}_{i,j}, i=1; j=1,2,\dots,M, \\ \frac{8(L-1)-2}{12(L-1)-1} \bar{B}_{i,j}, i=k_3; j=L, \\ \bar{B}_{i,j}, \text{ для всех остальных точек;} \end{cases} \quad (17)$$

$$F_{i,j} = \begin{cases} t_{i,j}^n + \bar{F}_{i,j}, i=k_3; j=L+1, L+2,\dots,M, \\ t_{i,j}^n + \frac{4(L-1)+1}{12(L-1)-1} \bar{F}_{i,j}; i=k_3; j=L, \\ t_{i,j}^n, \text{ для всех остальных точек;} \end{cases} \quad (18)$$

$$C_{i,j} = 1 + A_{i,j} + B_{i,j} \quad (19)$$

$$\text{где } \bar{A}_{i,j} = \frac{\lambda_{i-\frac{1}{2},j} \Delta\tau}{Cv_{i,j} \Delta x^2}, \bar{B}_{i,j} = \frac{\lambda_{i+\frac{1}{2},j} \Delta\tau}{Cv_{i,j} \Delta x^2}, \bar{F}_{i,j} = \frac{2q_0^n \Delta\tau}{Cv_{i,j} \Delta x}.$$

Решив систему уравнений (9), получим температурное поле на полуцелом шаге. Температурное поле на шаге $\tau + \Delta\tau$ определяется из решения аналогичной системы уравнений по направлению r

$$A_{i,j} t_{i,j-1}^{n+1} - C_{i,j} t_{i,j}^{n+1} + B_{i,j} t_{i,j+1}^{n+1} = -F_{i,j} \quad (20)$$

Как и при выводе расчетных коэффициентов по направлению x , наибольшие трудности возникают при описании точки (k_3, L) . В этом случае к заштрихованной поверхности элементарного объема (рис. 3, б) подводится тепловой поток $q = q_0$, а к остальным поверхностям - тепловые потоки, определяемые по закону Фурье.

Количество теплоты, входящее в расчетный элемент за время $\Delta\tau$ сверху

$$Q'_1 = -\frac{\lambda_{k_3,L+1} + \lambda_{k_3,L}}{2} \frac{t_{k_3,L}^{n+1} - t_{k_3,L+1}^{n+1}}{\Delta r} \Delta\tau \Delta S'_1 + q_0^n \Delta\tau \Delta S'_2, \quad (21)$$

снизу -

$$Q'_2 = -\frac{\lambda_{k_3,L} + \lambda_{k_3,L-1}}{2} \frac{t_{k_3,L}^{n+1} - t_{k_3,L-1}^{n+1}}{\Delta r} \Delta\tau \Delta S'_3 \quad (22)$$

При этом увеличение энтальпии расчетного элемента

$$\Delta W' = Cv_{k_3,L} \cdot \left(t_{k_3,L}^{n+1} - t_{k_3,L}^{n+\frac{1}{2}} \right) \cdot \Delta V, \quad (23)$$

где площади равны

$$\begin{aligned}
\Delta S'_1 &= \left(r_L + \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta\varphi \cdot \frac{\Delta x}{2} = \frac{2(L-1)+1}{4} \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta x \cdot \Delta r, \\
\Delta S'_2 &= r_L \Delta\varphi \cdot \frac{\Delta x}{2} = \frac{(L-1)}{2} \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta x \cdot \Delta r, \\
\Delta S'_3 &= \left(r_L - \frac{\Delta r}{2} \right) \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta x = \frac{2(L-1)-1}{2} \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta x \cdot \Delta r
\end{aligned} \quad (24)$$

а объем элемента вычисляется по формуле (14).

Выполняя равенство $Q'_1 + Q'_2 = \Delta W'$ и учитывая (14), (21)–(24), получим:

$$\begin{aligned}
& -\frac{\lambda_{k_3,L+\frac{1}{2}} \Delta\tau \Delta x (2(L-1)+1) \Delta\varphi (t_{k_3,L}^{n+1} - t_{k_3,L+1}^{n+1}) + q_0^n \Delta\tau \Delta r \Delta\varphi \Delta x}{4} \times \\
& \times (L-1) + \frac{\lambda_{k_3,L-\frac{1}{2}} \Delta\tau \Delta x \Delta\varphi (2(L-1)-1) (t_{k_3,L-1}^{n+1} - t_{k_3,L}^{n+1})}{2} = \\
& = \frac{12(L-1)-1}{16} \Delta r^2 \Delta x \Delta\varphi Cv_{k_3,L} (t_{k_3,L}^{n+1} - t_{k_3,L}^n)
\end{aligned}$$

$$\text{где } \lambda_{k_3,L-\frac{1}{2}} = \frac{\lambda_{k_3,L} + \lambda_{k_3,L-1}}{2}, \lambda_{k_3,L+\frac{1}{2}} = \frac{\lambda_{k_3,L} + \lambda_{k_3,L+1}}{2}.$$

Приводя последнее уравнение к виду (20), получим

$$\begin{aligned}
A_{k_3,L} &= \frac{\lambda_{k_3,L-\frac{1}{2}} \cdot \Delta\tau}{Cv_{k_3,L} \cdot \Delta r^2} \cdot \frac{8(2(L-1)-1)}{12(L-1)-1}, \\
B_{k_3,L} &= \frac{\lambda_{k_3,L+\frac{1}{2}} \cdot \Delta\tau}{Cv_{k_3,L} \cdot \Delta r^2} \cdot \frac{4(2(L-1)+1)}{12(L-1)-1}, \\
C_{k_3,L} &= 1 + A_{k_3,L} + B_{k_3,L}, \\
F_{k_3,L} &= t_{k_3,L}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{q_0^n \cdot \Delta\tau}{Cv_{k_3,L} \cdot \Delta r} \cdot \frac{8(L-1)}{12(L-1)-1}.
\end{aligned} \quad (25)$$

В общем случае коэффициенты уравнения (19) описываются следующими зависимостями

$$A_{i,j} = \begin{cases} 0, & i=1,2,\dots,N; j=1, \\ 4\bar{A}_{i,j} \frac{2(j-1)-1}{4(j-1)-1}, & i=1,2,\dots,k_3; j=M; \\ \bar{A}_{i,j} \frac{2(j-1)-1}{2(j-1)}, & i=k_3+1, k_3+2,\dots,N; j=L, \\ \bar{A}_{i,j} \frac{2(j-1)-1}{2(j-1)}, & \text{для всех остальных точек, кроме } (k_3, L). \end{cases} \quad (26)$$

$$B_{i,j} = \begin{cases} 0, i=1,2,\dots,k_3; j=M; i=k_3+1, k_3+2,\dots,N; j=L, \\ 4\bar{B}_{i,j}, & i=1,2,\dots,N; j=1, \\ \bar{B}_{i,j} \frac{2(j-1)+1}{2(j-1)}, & \text{для всех остальных точек, кроме } (k_3, L). \end{cases} \quad (27)$$

$$F_{i,j} = \begin{cases} t_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + 8\bar{F}_{i,j} \frac{j-1}{4(j-1)-1}, & i=1,2,\dots,k_3; j=M, \\ & i=k_3+1, k_3+2,\dots,N, j=L; \\ t_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}, & \text{для всех остальных точек, кроме } (k_3, L), \end{cases} \quad (28)$$

$$C_{i,j} = 1 + A_{i,j} + B_{i,j} \quad (29)$$

$$\text{где } \bar{A}_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j-\frac{1}{2}} \Delta\tau}{Cv_{i,j} \Delta r^2}, \bar{B}_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j+\frac{1}{2}} \Delta\tau}{Cv_{i,j} \Delta r^2}, \bar{F}_{i,j} = \frac{q_0^n \Delta\tau}{Cv_{i,j} \Delta r}.$$

Особое внимание следует уделить обеспечению нагрева сварного шва с заданной скоростью. Для решения этой задачи используем предложенную в [8-9]

методику, основанную на последовательном решении прямых и обратных задач теплопроводности.

Поскольку сварной шов на поверхности характеризуется расчетной точкой (k_3, L) , то для получения значений q_0^n , определяющих зависимость $q_0 = f(\tau)$ на каждом временном шаге, составим балансовое уравнение для элемента, показанного на рис.3, и выразим из него значение q_0^n . Получим

$$q_0^n = A_0 V_H + A_1 \left(t_{k_3, L}^n - t_{k_3, L+1}^n \right) + A_2 \left(t_{k_3, L}^n - t_{k_3, L-1}^n \right) + A_3 \left(t_{k_3, L}^n - t_{k_3+1, L}^n \right) + A_4 \left(t_{k_3, L}^n - t_{k_3-1, L}^n \right), \quad (30)$$

где

$$A_0 = \frac{Cv_{k_3, L} \cdot (12L - 13)}{2 \cdot Z}; \quad A_1 = \frac{\lambda_{k_3, L+1/2} \cdot \Delta x \cdot (2L - 1)}{Z \cdot \Delta r};$$

$$A_2 = \frac{\lambda_{k_3, L-1/2} \cdot \Delta x \cdot (2L - 3)}{Z \cdot \Delta r}; \quad A_3 = \frac{\lambda_{k_3+1/2, L} \cdot \Delta r \cdot (4L - 5)}{Z \cdot \Delta x};$$

$$A_4 = \frac{\lambda_{k_3-1/2, L} \cdot \Delta r \cdot (L - 1)}{Z \cdot \Delta x}; \quad Z = (4L - 3) \cdot \Delta r + 4(L - 1) \cdot \Delta x.$$

Таким образом, расчеты на временном шаге $\tau_{n+1} = (n + 1)\Delta t$ выполняются в следующем порядке:

1. Вычисление значений $\lambda_{i,j}$, $Cv_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, N_i$, $j = 1, 2, \dots, M$) по известному температурному полю $t_{i,j}^n$; и значения q_0^n по формуле (30).
2. Нахождение $A_{i,j}$, $B_{i,j}$, $C_{i,j}$, $F_{i,j}$ по формулам (16)–(19).
3. Вычисление $t_{i,j}^{n+1/2}$ по методу прогонки.
4. Определение значений $A_{i,j}$, $B_{i,j}$, $C_{i,j}$, $F_{i,j}$ по формулам (26)–(29).
5. Нахождение $t_{i,j}^{n+1}$ по методу прогонки.
6. По вычисленному полю температур $t_{i,j}^{n+1}$ уточняются значения коэффициентов $\lambda_{i,j}$ и $Cv_{i,j}$, а также значение q_0^n , и повторяется выполнение пп. 2÷5.

Повторение п. 6 проводится 2–3 раза, после чего получим окончательное значение температурного поля в момент времени τ_{n+1} и переходим к следующему временному слою. Вычисления продолжаются до выполнения заданных условий окончания счета.

Отметим, что данный алгоритм позволяет рассчитывать температурные поля не только в период нагрева, но и на стадиях выдержки и охлаждения, т.е. обеспечивает возможность моделирования полного цикла отпуска сварного изделия. Так, на стадии выдержки необходимый тепловой поток q_0^n определяется при $V_n = 0$, а на стадии охлаждения в формуле (30) используется отрицательное значение V_n .

Выводы

На основе модифицированного метода элементарных тепловых балансов разработан алгоритм, позволяющий оценивать тепловое состояние изделия в виде двух цилиндров разного диаметра при изменяющихся по поверхности изделия условиях теплообмена. Предложена формула, позволяющая определить условия теплообмена, обеспечивающие заданное изменение температур на стыке двух цилиндров. Алгоритм может быть использован при разработке рациональной технологии местного отпуска электродов ЭШП, а также при определении конструктивных параметров нагревательных устройств для осуществления указанного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Манусов И.Н., Беляев Н.М. Местная термическая обработка крупногабаритных сварных изделий в тяжелом машиностроении: Обзор.- М: ЦНИИТЭИ-тяжмаш, 1985.-24 с.
2. Электрошлаковая сварка электродов для ЭШП /В.М.Семенов, А.Е.Малый и др.//Сварочное производство, 1984, №9, с.16-17.
3. Алексеев Г.Ф. Обеспечение предельно допустимого градиента температурного поля при местной термообработке сварных швов сосудов равномерно распределенным источником теплоты// Сварочное производство. – 1984.- №2. – С.7-8.
4. О распределении температуры при местном нагреве конструкций для сварки/ А.В.Козлов, Т.М.Попова, Ю.И.Рыбин и др.//Физика и химия обработки материалов. – 1983.- №6. – С.24-28.
5. Климовичкин М.М. Методика определения ширины зоны нагрева при местном высоком отпуске кольцевых сварных швов сосудов// Сварочное производство. – 1982.- №2. – С.14-15.
6. Манусов И.Н., Каримов И.К. Моделирование теплового состояния крупногабаритных изделий при местном нагреве// Теплофизические процессы в энергетических установках – Минск, 1982, с.119-123.
7. Манусов И.Н., Каримов И.К. Моделирования місцевого нагріву плитних конструкцій у режимі непрямого теплообміну// Юбилейный сборник научных-технических трудов.- Днепродзержинск, ДГТУ, 1995 - С. 322-328
8. Беляев Н.М., Манусов И.Н., Каримов И.К. Оптимизация режимов местного нагрева изделий//Физика и химия обработки материалов. – 1983.- №4. – С.34-38.
9. Манусов И.Н., Каримов И.К. Оптимизация процессов местного нагрева изделий// Изв. вузов СССР – Энергетика.- 1989.- №6.- С. 98-100.
10. Беляев Н.М., Манусов И.Н., Каримов И.К. Применение метода элементарных тепловых балансов к решению задач теплопроводности со сложными граничными условиями. – Днепропетровск: ДГУ, 1985. - 128 с.