

Комп'ютерно орієнтований алгоритм керування процесом місцевої термообробки великогабаритних деталей

I. K. KAPIMOV

Дніпродзержинський державний технічний університет

Запропоновано алгоритм чисельного моделювання місцевої термообробки деталей циліндричної форми з визначенням параметрів керування у вигляді теплових потоків, підведення яких до поверхні виробу забезпечує проведення процесу у відповідності з заданим графіком.

Предложен алгоритм численного моделирования местной термообработки деталей цилиндрической формы с определением параметров управления в виде тепловых потоков, подвод которых к поверхности изделия обеспечивает проведение процесса в соответствии с заданным графиком.

Proposed an algorithm of the numerical simulation for local thermal treatment of cylindrical parts with determination of control parameters in the form of thermal flows, supplied to the surface of a product, which ensures the process, is conducted in accordance with a predetermined schedule.

Вступ. Великогабаритні деталі (наприклад, станини прокатного стану) зазвичай виготовляються шляхом зварювання менших деталей, після чого обов'язково проводиться термообробка для зняття термічних напружень в зоні зварного шва [1,2]. Оскільки така зона значно менша від виробу в цілому, то перспективною є місцева термообробка з обмеженою областю підведення теплоти, що дає можливість суттєво скоротити витрати енергоресурсів на проведення процесу. При розробці режимів місцевої термообробки важливою є інформація про температурний режим виробу з врахуванням умов зовнішнього теплообміну, які визначаються характеристиками конкретного теплотехнічного обладнання і змінюються як в просторі, так і в часі [3-5].

Місцева термообробка виробів різної форми досліджувалася багатьма вітчизняними та зарубіжними вченими, які вивчали вплив окремих конструктивних та

режимних параметрів [3-4], аналізували тепловий стан виробів за допомогою аналітичних [5-6] та чисельних [7-9] методів. В той же час реальні процеси характеризуються великою різноманітністю як за формою виробів, так і за режимами проведення термообробки, що потребує подальших досліджень, зокрема, в напрямку розробки алгоритмів керування процесом на основі моделювання повного циклу термообробки з визначенням зовнішніх умов, які забезпечують її оптимальне проведення.

Постановка задачі. В даній роботі розглядається процес місцевої термообробки в газових переносних печах. Для такого випадку в якості розрахункової схеми доцільно використовувати так звану трьохзонну схему, відповідно до якої на поверхні виробу виділяються три зони з різними умовами теплообміну [3,11]. Для деталі циліндричної форми розрахункова схема місцевої термообробки наведена на *рис. 1*.

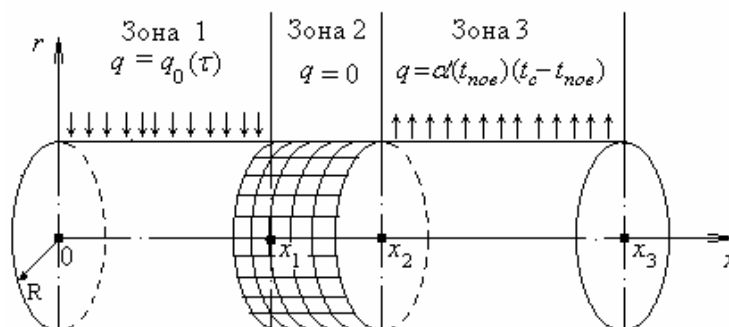


Рис. 1. Розрахункова схема для деталі циліндричної форми

Схема передбачає симетричне розташування виробу відносно осі теплотехнічного пристрою, внаслідок чого розглядається тільки одна половина виробу.

В першій зоні відбувається власне нагрів поверхні в межах робочої зони теплотехнічного пристрою, причому механізм підведення теплоти може бути різним. Для врахування цього факту можна використовувати класичні варіанти (стала щільність теплового потоку, закон Ньютона – Ріхмана, закон Стефана - Больцмана) та різні їх комбінації.

Друга зона відповідає ділянкам на поверхні виробу, які перебувають в безпосередньому контакті з футеровкою пристрою, внаслідок чого умови теплообміну можуть вважатися адіабатними, тобто тепловим потоком можна нехтувати.

Третя зона відповідає тій частині виробу, яка знаходиться поза межами теплотехнічного обладнання, в умовах охолодження поверхні оточуючим середовищем.

Обмежимося випадком, коли щільність теплового потоку в зоні 1 змінюється з перебігом часу, але по поверхні виробу є сталою. Тоді в рамках описаної схеми математична модель процесу переносу теплоти має вигляд

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

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

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

$$\left. \frac{\partial t(x, r, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial t(x, r, \tau)}{\partial x} \right|_{x=x_3} = 0, \quad (4)$$

$$\lambda(t) \frac{\partial t(x, R, \tau)}{\partial r} \Big|_{0 < x < x_3} = q_1(x, \tau), \quad (5)$$

$$q_1(x, t) = \begin{cases} q_0(\tau) & , \quad 0 < x \leq x_1 \\ 0 & , \quad x_1 < x \leq x_2 \\ \alpha(t_c - t(x, R, \tau)) & , \quad x_2 < x \leq x_3 \end{cases} \quad (6)$$

$$\alpha = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon_m \left[T_n^3 + T_n^2 \cdot T_c + T_n \cdot T_c^2 + T_c^3 \right] + 2,55 \cdot \sqrt[4]{T_n - T_c}, \quad (7)$$

де T_n – температура поверхні виробу, К;
 T_c – температура оточуючого середовища, К;
 ε_m – ступінь чорноти поверхні;
 $T_n = t(x, R, \tau) + 273$; $T_c = t_c + 273$.

Дана модель описує тепловий стан виробу при заданому законі підведення теплоти в зоні 1. Однак, у випадку проведення термообробки зазвичай регламентується температурний графік, додержання якого і забезпечує досягнення основної мети - зняття термічних напружень в зоні зварного шва. Приклад такого графіка наведений на рис. 2.

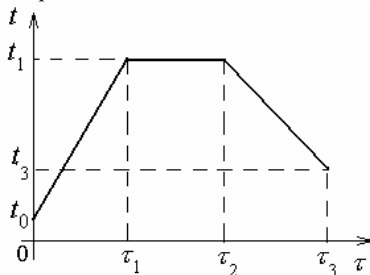


Рис. 2. Типовий графік термообробки

Як видно, графік включає в себе стадії нагріву, витримки та охолодження. Швидкість процесів нагріву і охолодження не повинна перевищувати задану графіком швидкість. На практиці досить часто при визначенні умов зовнішнього теплообміну швидкість процесів нагріву і охолодження занижується настільки, щоб гарантовано не перевищити регламентовану графіком швидкість. Як наслідок – невиправдані перевитрати енергоносіїв та сповільнення ритму роботи, часто – досить суттєве. Виходом з цього становища є побудова таких алгоритмів керування процесом термообробки, які б забезпечували точне додержання графіку термообробки (з врахуванням похибок приладів керування) [10].

Результати. Розв'язання подібних задач за допомогою аналітичних методів пов'язане з принциповими математичними труднощами, призводить до спрощення математичних моделей і суттєвого зниження практичної цінності одержаних результатів. В даній роботі використовується спеціальна методика, заснована на використанні універсальних різницевоїх схем з використанням модифікованого методу елементарних теплових балансів для одержання розрахункових формул для визначення параметрів керування процесом [11]. Відповідно до локально-одновимірного методу вводиться половинний часовий крок $\tau_{n+1/2}$ і послідовно розв'язуються одновимірні задачі з використанням в якості початкових умов результатів попереднього напівкроку. Різницеві рівняння розв'язуються методом прогонки.

Введемо різницеву сітку

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

$$j = 0, 1, 2, \dots, M; n = 1, 2, \dots, S; \Delta x = \frac{x_3}{N}; \Delta r = \frac{R}{M}; \Delta \tau = \frac{\tau}{S}). C$$

схема розбиття досліджуваної області на розрахункові елементи з вказівкою основних типів розрахункових точок наведена на рис. 3.

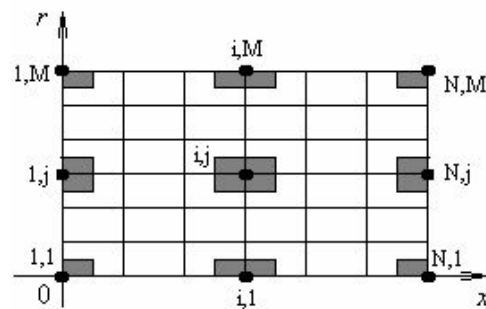


Рис. 3. Розрахункова схема для деталі циліндричної форми

Нехай $t_{i,j}^n$ – значення температури, а $\lambda_{i,j}$ і $C_{v,i,j}$ – значення коефіцієнтів теплопровідності та об'ємної теплоємності металу в точці (x_i, r_j) в момент часу τ_n . Тоді по напрямку x одержимо систему рівнянь

$$A_{i,j} t_{i-1,j}^{n+1/2} - C_{i,j} t_{i,j}^{n+1/2} + B_{i,j} t_{i+1,j}^{n+1/2} = -F_{i,j} \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, M$$

де

$$A_{i,j} = \begin{cases} 0 & , \quad i = 1 \\ \bar{A}_{i,j} & , \quad i = 2, 3, \dots, N-1; \\ 2\bar{A}_{i,j} & , \quad i = N \end{cases} \quad (9)$$

$$B_{i,j} = \begin{cases} 2\bar{B}_{i,j} & , \quad i = 1 \\ \bar{B}_{i,j} & , \quad i = 2, 3, \dots, N-1; \\ 0 & , \quad i = N \end{cases} \quad (10)$$

$$\bar{A}_{i,j} = \frac{\lambda_{i-1,j} + \lambda_{i,j}}{2\Delta x^2}; \quad \bar{B}_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j} + \lambda_{i+1,j}}{2\Delta x^2}; \quad (11)$$

$$C_{i,j} = \frac{c_{v,i,j}}{\Delta \tau} + A_{i,j} + B_{i,j}; \quad F_{i,j} = \frac{c_{v,i,j}}{\Delta \tau} t_{i,j}^n; \quad (12)$$

По напрямку r аналогічна система рівнянь має вигляд

$$A_{i,j} t_{i,j-1}^{n+1} - C_{i,j} t_{i,j}^{n+1} + B_{i,j} t_{i,j+1}^{n+1} = -F_{i,j}, \quad (13)$$

$i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, M$

де

$$A_{i,j} = \begin{cases} 0 & , \quad j = 1 \\ \frac{j-1,5}{j-1} \bar{A}_{i,j} & , \quad j = 2, 3, \dots, M-1; \\ \frac{2j-3}{j-1,25} \bar{A}_{i,j} & , \quad j = M \end{cases} \quad (14)$$

$$B_{i,j} = \begin{cases} 4 \bar{B}_{i,j} & , \quad j = 1 \\ \frac{j-0,5}{j-1} \bar{B}_{i,j} & , \quad j = 2, 3, \dots, M-1; \\ 0 & , \quad j = M \end{cases} \quad (15)$$

$$\bar{A}_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j-1} + \lambda_{i,j}}{2 \Delta \tau^2}; \quad \bar{B}_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1}}{2 \Delta \tau^2}; \quad (16)$$

$$C_{i,j} = \frac{c_{v,i,j}}{\Delta \tau} + A_{i,j} + B_{i,j}; \quad (17)$$

$$F_{i,j} = \begin{cases} \frac{c_{v,i,j}}{\Delta \tau} t_{i,j}^{n+1/2} & , \quad j = 1, 2, \dots, M-1 \\ \frac{c_{v,i,j}}{\Delta \tau} t_{i,j}^{n+1/2} + \frac{8(j-1)}{4j-5} \frac{q_i^n}{\Delta \tau} & , \quad j = M \end{cases}; \quad (18)$$

Розв'язуючи послідовно системи рівнянь (8) та (13) методом прогонки, можна одержати температури виробу в розрахункових точках в момент часу τ_n при відомих умовах зовнішнього теплообміну (6). Однак, необхідність дотримання заданого графіку термообробки зумовлює невизначеність потоку $q_0(\tau)$, який власне і є параметром керування, що забезпечує проведення даного технологічного процесу.

Для визначення на кожному часовому кроці τ_{n+1} значення $q_1^n = q_0(\tau_n)$ використаємо явне різницеве рівняння в точці (1, M) в момент часу τ_{n+1} , виходячи з того, що значення $t_{1,M}^{n+1} = T^*$ відоме з графіку термообробки. Одержимо

$$q_1^n = c_{v,1,M} \frac{2M-3}{M-1} \frac{\Delta \tau}{4} \frac{T^* - t_{1,M}^n}{\Delta \tau} + \frac{\lambda_{1,M} + \lambda_{2,M}}{2 \Delta x} \frac{2M-3}{2M-2} \frac{\Delta \tau}{\Delta x} (t_{1,M}^n - t_{2,M}^n) + \frac{\lambda_{1,M} + \lambda_{1,M-1}}{2 \Delta \tau} \frac{2M-3}{M-1} (t_{1,M}^n - t_{1,M-1}^n). \quad (19)$$

Остаточно для обчислення значення q_1^n в формулі (18) маємо

$$q_i^n = \begin{cases} q_1^n & , \quad 1 \leq i < N_1 \\ q_1^n / 2 & , \quad i = N_1 \\ 0 & , \quad N_1 < i < N_2 \\ \frac{1}{2} \alpha (t_{i,M}^n) (t_c - t_{i,M}^n) & , \quad i = N_2 \\ \alpha (t_{i,M}^n) (t_c - t_{i,M}^n) & , \quad N_2 < i < N \end{cases} \quad (20)$$

Узагальнена блок-схема алгоритму визначення параметрів керування у вигляді теплових потоків, підведення яких до поверхні виробу забезпечує проведення процесу у відповідності з заданим графіком, наведена на рис. 4. При цьому масиви T1, T2, T3 відповідають температурам в розрахункових точках на попередньому, половинному та наступному часовому кроці (в тексті - $t_{i,j}^n$, $t_{i,j}^{n+1/2}$ і $t_{i,j}^{n+1}$, відповідно).

На початку роботи алгоритму (блок 2) описуються функції $\lambda(t)$ і $c_v(t)$, які задають залежність теплофізичних властивостей від температури; вводяться всі необхідні дані, зокрема, параметри графіку термообробки ($\tau_1, \tau_2, \tau_3, V_1 = (\tau_1 - \tau_0) / \tau_1,$

$V_2 = (\tau_3 - \tau_1) / (\tau_3 - \tau_2)$); в масив T1 заносяться температури розрахункових точок відповідно до початкової умови (2).

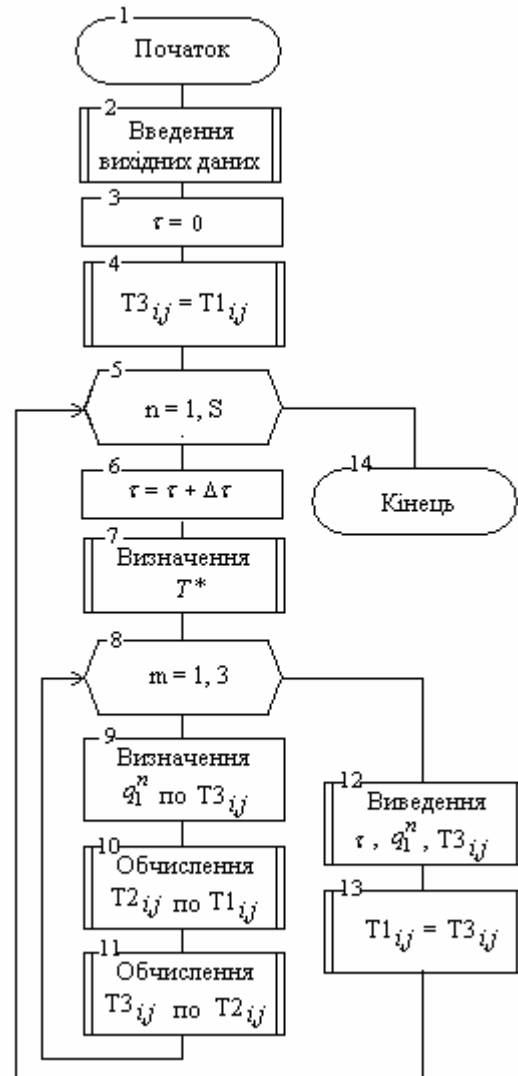


Рис. 4. Узагальнена блок-схема алгоритму визначення параметрів керування

Блоки 6-13 реалізують розрахунки на одному часовому кроці. При цьому спочатку визначається темпе-

ратура в центрі зварного шва, виходячи з заданого графіку термообробки

$$T^* = t_{i,M}^n + V_H \cdot \Delta\tau,$$

$$\text{де } V_H = \begin{cases} V_1, & 0 < \tau < \tau_1 \\ 0, & \tau_1 \leq \tau < \tau_2 \\ V_2, & \tau_2 \leq \tau \leq \tau_3 \end{cases}.$$

Потім обчислюється величина необхідного теплового потоку за формулою (19), після чого визначаються температури в розрахункових точках. Оскільки значення q_i^n обчислюється з явного різницевого рівняння, то для його уточнення проводиться три ітерації (блоки 8-11).

Блок 10 передбачає обчислення коефіцієнтів за формулами (9-12) та реалізацію процедури методу прогонки для визначення $t_{i,j}^{n+1/2}$. В блоці 11 обчислюються коефіцієнти за формулами (14-18, 20) та реалізується процедура методу прогонки для визначення $t_{i,j}^{n+1}$.

Висновки

1. Одержані розрахункові формули для числового моделювання місцевої термообробки деталей циліндричної форми.

2. Запропоновано комп'ютерно орієнтований алгоритм визначення параметрів керування у вигляді теплових потоків, підведення яких до поверхні виробу забезпечує проведення процесу у відповідності з заданим графіком термообробки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Винокуров В. А. Отпуск сварных конструкций для снижения напряжений. — М.: Машиностроение. 1973. — 215 с.
2. Электрошлаковая сварка электродов для ЭСП / В. М. Семенов, А. Е. Малый и др. // Сварочное производство. — 1984. — №9. — С.16—17.
3. Манусов И. Н., Беляев Н. М. Местная термическая обработка крупногабаритных сварных изделий в тяжелом машиностроении: Обзор. — М.: ЦНИИТЭИтяжмаш. 1985. — 24 с.
4. Климочкин М. М. Методика определения ширины зоны нагрева при местном высоком отпуске кольцевых сварных швов сосудов / Сварочное производство. — 1982. — №2. — С.14—15.
5. 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.
6. 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.
7. Добрянський І. М., Божидарнік В. В. Чисельно-аналітичні схеми розрахунку зварних пластинчатих систем // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". — Луцьк: 2012. — Випуск №37. — С.31—37.
8. Манусов И. Н., Каримов И. К. Моделирование теплового состояния крупногабаритных изделий при местном нагреве // Теплофизические процессы в энергетических установках. — Минск: 1982. — С.119—123.
9. Манусов И. Н., Каримов И. К. Моделирование местного нагрева плитных конструкций у режиме непрямого теплообмена // Юбилейный сборник научно-технических трудов. — Днепропетровск: ДГУ, 1995. — С.322—328.
10. Манусов И. Н., Каримов И. К. Оптимизация процессов местного нагрева изделий // Изв. вузов СССР. — Энергетика. — 1989. — №6. — С.98—100.
11. 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.

пост.29.04.2015