УДК 517.958; 612.014.424

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИХТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПО ДАННЫМ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В.П. Тимошенко, В.П. Шерышев

На основе представления процесса индукционной наплавки твердых сплавов осуществлено математическое моделирование тепловых процессов в деталях, нагреваемых высокочастотным электромагнитным полем через краевую задачу теплопроводности для гомогенной изотропной среды. Численное решение задачи позволяет восстанавливать теплофизические характеристики шихты по данным натурного эксперимента.

Ключевые слова: математические модели теплопроводности, индукционная наплавка твердых сплавов, распределение температуры.

В настоящее время на отечественных предприятиях сельскохозяйственного машиностроения упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин осуществляется методами индукционной, дуговой и плазменной наплавки [1]. Проведенные исследования по упрочнению деталей новыми методами, такими как наплавка с помощью ускорителя [2] и электронно-лучевая наплавка [3] по ряду причин промышленного применения не нашли.

Каждый метод имеет свою область применения. Индукционная наплавка деталей почвообрабатывающих машин и орудий является наиболее технологичным и производительным процессом по сравнению с другими традиционными методами упрочнения таких деталей.

Проведенные исследования нагрева наплавляемой детали и шихты при нерегулируемом режиме работы генератора показали, что генератор около 80 % общего времени наплавки работает с низким к. п. д., а наплавляемая деталь перегревается, что приводит к образованию дефектов. Для устранения этих недостатков режим работы генератора и нагрев детали должен быть оптимизирован [4–7].

Правильное решение поставленной задачи во многом зависит от того как были заданы технологические параметры, в частности теплофизические свойства шихты. Для того чтобы выбрать оптимальные в том или ином смысле параметры необходимо провести большой объем экспериментальной работы в лабораторных условиях. При этом эксперимент значительно усложняется наличием высоких температур, характерных для большинства наплавляемых изделий. Численный эксперимент на ЭВМ при наличии математической модели реального физического процесса в значительной мере позволяет сократить объем экспериментальных работ, проводимых с целью определения оптимальных параметров индукционной наплавки. В этих условиях теоретический анализ приобретает особую актуальность [8–10].

Теоретическое исследование термического цикла индукционной наплавки затрудняется отсутствием теплофизических характеристик используемой для наплавки шихты.

В статье рассматривается методика численного определения коэффициентов теплопроводности и теплопередачи шихты в процессе индукционной наплавки по экспериментально замеренным полям температур.

При некоторых упрощающих предположениях процесс переноса тепла в системе шихта – деталь можно описать нелинейной краевой задачей для уравнения теплопроводности [11]:

$$C_M(T)\gamma_M(T)\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_M(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right), \delta \prec x \prec x_0-\delta, t \succ 0, \tag{1}$$

$$C_M(T)\gamma_M(T)\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_M(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{P(t)}{\delta}, \begin{cases} 0 \prec x \prec \delta, t \succ 0 \\ x_0-\delta \prec x \prec x_0 \end{cases}, \tag{2}$$

$$C_Ш(T)\gamma_Ш(T)\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_Ш(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right), x_0 \prec x \prec x_1, t \succ 0, \tag{3}$$

$$-\lambda_{М}(T)\frac{\partial T}{\partial x}=\alpha_{М}(T)(T-\theta)+\beta\varepsilon_{М}(T)(T^4-\theta^4),\ x=0,t\succ 0, \quad (4)$$

$$\lambda_{М}(T)\frac{\partial T}{\partial x}=\lambda_{Ш}(T)\frac{\partial T}{\partial x},\ x=x_0,t\succ 0, \quad (5)$$

$$-\lambda_{Ш}(T)\frac{\partial T}{\partial x}=\alpha_{Ш}(T)(T-\theta)+\beta\varepsilon_{Ш}(T)(T^4-\theta^4),\ x=x_1,t\succ 0, \quad (6)$$

$$T\Big|_{\substack{\delta+0\\ x_0-\delta+0}}=T\Big|_{\substack{\delta-0\\ x_0-\delta-0}},\ \frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{\substack{\delta+0\\ x_0-\delta+0}}=\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{\substack{\delta-0\\ x_0-\delta-0}}, \quad (7)$$

$$T(x,0)=\theta,\ 0\le x\le x_1, \quad (8)$$

где δ – расстояние, равное глубине проникновения тока в металл.

Известно (данные получены в процессе экспериментальных наплавок) изменение температуры по времени в нескольких внутренних точках детали (в частности, на контакте шихта-металл):

$$T(x_P,t)=f_P(t),\ p=1,2,\ldots,\ L, 0\le x_P\le x_1. \quad (9)$$

Процесс наплавки разделим на этапы:

1) нагрев системы до перехода точки Кюри;

2) нагрев системы до появления жидкой фазы шихты (расплава);

3) плавление шихты.

Теплофизические характеристики металла и объемную теплоемкость шихты $\mathbf{C_{Ш}\gamma_{Ш}}$ считаем заданными функциями температуры. Предположим, что каждая стадия характеризуется постоянными теплофизическими свойствами металла и шихты. Если $\mathbf{\delta<<0,5x_o}$ и в слое $\boldsymbol{\delta}$ отсутствует градиент температуры, то можно проинтегрировать уравнение (2) и перейти к условию типа сосредоточенной теплоемкости на границах $\mathbf{x = 0}$ и $\mathbf{x = x_o}$ [11].

На каждом этапе моделирования будем определять коэффициенты $\boldsymbol{\lambda_{ш}}$ и $\boldsymbol{\alpha_{ш}}$ из решения линейной краевой задачи следующего вида:

$$C_{Mi}\gamma_{Mi}\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda_{Mi}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2},\ 0\prec x\prec x_0, t_i\prec t\le t_{i+1}, \quad (10)$$

$$C_{Шi}\gamma_{Шi}\frac{\partial T}{\partial t}=a_1\frac{\partial^2 T}{\partial x^2},\ x_0\prec x\prec x_1, t_i\prec t\le t_{i+1}, \quad (11)$$

$$\delta C_{Mi}\gamma_{Mi}\frac{\partial T}{\partial t}-\lambda_{Mi}\frac{\partial T}{\partial x}-\overline{\alpha}_{Mi}(T-\Theta)=P_i,\ x=0, t\succ t_i, \quad (12)$$

$$\delta C_{Mi}\gamma_{Mi}\frac{\partial T}{\partial t}-\lambda_{Mi}\frac{\partial T}{\partial x}-a_1\frac{\partial T}{\partial x}=P_i,\ x=x_0, t\succ t_2, \quad (13)$$

$$a_1\frac{\partial T}{\partial x}+a_2(T-\theta)=0,\ x=x_1, t\succ t_i \quad (14)$$

$$T(x,t_i)=\varphi_i(x),\ 0\le x\le x_1, \quad (15)$$

где $a_1=\lambda_{Шi}$, $a_2=\alpha_{Шi}$; параметр $\overline{\alpha}(T)=\alpha(T)+\beta\varepsilon(T^3+\theta T^2+\theta^2 T+\theta^3)$ можно охарактеризовать как обобщенный коэффициент теплоотдачи и на каждом этапе моделирования считать заданным $\boldsymbol{\alpha_{M}}$.

Параметры $\mathbf{a_1}$ и $\mathbf{a_2}$ определим из условия минимума функционала:

$$J(a_1,a_2)=\sum_{P=1}^{L}\int_{t_i}^{t_{i+1}}\left[T_p(t)-f_p(t)\right]^2dt\to\min \quad (16)$$

В качестве численного метода решения задачи (16) применим метод скорейшего спуска, согласно которому интеграционная последовательность строится по схеме:

$$a_k^{r+1}=a_k^r-\beta_r\frac{\partial J}{\partial a_k},\ k=1,2, \quad (17)$$

где **r** – номер итерации.

Вычислим производные функционала:

$$\frac{\partial J}{\partial a_k} = 2\sum_{p=1}^{L}\int_{t_i}^{t_{i+1}}\left[T_p(t) - f_p(t)\right]^2 \frac{\partial T_p(t)}{\partial a_k}dt,\ k = 1,\ 2. \quad (18)$$

Для определения функций $\theta_k(x,t) = \frac{\partial T(x,t)}{\partial a_k},\ k = 1,2,$ продифференцируем исходную задачу по параметрам $\mathbf{a_1}$ и $\mathbf{a_2}$. Получим две краевые задачи:

$$c_M \cdot \gamma_M \cdot \frac{\partial \theta_k}{\partial t} = \lambda_M \frac{\partial^2 \theta_\kappa}{\partial x^2}, 0 \prec x \prec x_0, t_i \prec t \le t_{i+1}, \quad (19)$$

$$c_ш \cdot \gamma_ш = a_1 \frac{\partial^2 \theta_\kappa}{\partial x^2} + R_1(T), x_0 \prec x \prec x_1, t_i \prec t \prec t_{i+1}, \quad (20)$$

$$\delta c_M \cdot \gamma_M \cdot \frac{\partial \theta_k}{\partial t} - \lambda_M \frac{\partial \theta_k}{\partial x} - \bar{\alpha}_M \cdot \theta_k = 0,\ x = 0,\ t \succ t_i, \quad (21)$$

$$\delta c_M \cdot \gamma_M \cdot \frac{\partial \theta_k}{\partial t} - \lambda_M \frac{\partial \theta_k}{\partial x} + a_1 \frac{\partial \theta_k}{\partial x} + R_2(T) = 0,\ x = x_0,\ t \succ t_i, \quad (22)$$

$$a_1 \frac{\partial \theta_k}{\partial x} + a_2 \theta_k + R_3(T) = 0,\ x = x_1,\ t \succ t_i, \quad (23)$$

$$\theta_k(x,0) = g_k(x),\ 0 \le x \le x_1,\ k = 1,2. \quad (24)$$

Функции $\mathbf{R_i(T)}$ (i = 1, 2, 3) различны при $\mathbf{k}$ = 1, 2. Параметр спуска $\boldsymbol{\beta_r}$ определяют из условия минимума функционала (16) на $\mathbf{r+1}$ итерации:

$$\beta_r : J\left(a_k^{(r+1)}, k = 1,2\right) = \min_{\beta \ge 0} J\left(a_k^{(r)} - \beta_r \frac{\partial J}{\partial a_k},\ k = 1,2\right).$$

Параметр $\boldsymbol{\beta_r}$ можно выразить в явном виде. Пусть $a_\kappa^{(r)}$ (к = 1, 2) получило приращение – $\beta_r \frac{\partial J}{\partial a_k}$. Тогда функция T(x, t) получит приращение $\boldsymbol{\psi_r}$ **(x, t)**. Из соотношений (10)–(15) получим:

$$c_M \cdot \gamma_M \cdot \frac{\partial \psi_r}{\partial t} = \lambda_M \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x^2},\ 0 \prec x \prec x_0,\ t_i \prec t \le t_{i+1}, \quad (25)$$

$$c_ш \cdot \gamma_ш \cdot \frac{\partial \psi_r}{\partial t} = a_1^{(r)} \frac{\partial^2 \psi_r}{\partial x^2} - \beta_r \frac{\partial J}{\partial a_1} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, x_0 \prec x \prec x_1, t_i \prec t \le t_{i+1}, \quad (26)$$

$$\delta c_M \cdot \gamma_M \cdot \frac{\partial \psi_r}{\partial t} - \lambda_M \frac{\partial \psi_r}{\partial x} - \bar{\alpha}_M \cdot \psi_r = 0,\ x = 0,\ t \succ t_i, \quad (27)$$

$$\delta c_м \cdot \gamma_м \cdot \frac{\partial \psi_r}{\partial t} - \lambda_м \frac{\partial \psi_r}{\partial x} + a_1^{(r)} \frac{\partial \psi_r}{\partial x} - \beta_r \frac{\partial J}{\partial a_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = 0, x = x_0 \prec x_1, t \succ t_i, \quad (28)$$

$$a_1^{(r)} \frac{\partial J}{\partial a_1} + a_2^{(r)} \psi_r - \beta_r \left[\frac{\partial J}{\partial a_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial J}{\partial a_2} \cdot (T - \theta)\right] = 0, x = x_1, t \succ t_i, \quad (29)$$

$$\psi_r(x,0) = g_r(x), 0 \le x \le x_1, r = 0,1,2. \quad (30)$$

Задача (25)–(30) линейна относительно **βr**. Поэтому можно записать:

$$J^{r+1} = \sum_{p=1}^{L} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left[T_p(t) - f_p(t) - \beta_r \psi_r(x_{p1}t)\right]^2 dt.$$

Из условия $\frac{\partial J^{(r+1)}}{\partial \beta_r} = 0$ получим:

$$\beta_r = \frac{\sum_{p=1}^{L} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left[T_p(t) - f_p(t)\right] \psi_r(x_{p1}t) dt}{\sum_{p=1}^{L} \int_{t_i}^{t^{i+1}} \left[\psi_r(x_{p1}t)\right]^2 dt}. \quad (31)$$

Итерационный процесс строим по следующей схеме:

– задается **0**-приближение искомых пара-метров и решается задача (10)–(15);

– по известному полю температур определяются функции $\Theta_k(x, t)$; К = 1, 2 – из решения задач (19)–(24);

– по соотношению (18) рассчитывается градиент функционала;

– далее определяется функция $\boldsymbol{\psi_r(x, t)}$ из (25)–(30);

– вычисляется глубина спуска $\boldsymbol{\beta_r}$ по формуле (31);

– находится новое приближение α_k^{r+1} из (17).

Для проверки правильности разработанной методики проведена экспериментальная наплавка. Измерение температуры производили с помощью термопар и информационно-измерительного комплекса, позволяющего вести регистрацию и обработку полученных данных.

Неизвестные параметры рассчитывали в два этапа: сначала восстанавливали коэффициент теплопроводности $\boldsymbol{\lambda_{ш}}$, затем по известному $\boldsymbol{\lambda_{ш}}$ определяли коэффициент теплоотдачи $\boldsymbol{\alpha_{ш}}$. При выбранных нулевых приближениях, заданную точность вычислений достигли за 20 итераций.

Данный подход распространяется и на случай, когда рассматриваемый процесс разбивается на несколько стадий. Для этого достаточно задать теплофизические характеристики металла и шихты в виде кусочно-постоянных функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткачев, В. Н. Индукционная наплавка твердых сплавов / В. Н. Ткачев, Б. М. Фиштейн, Н. В. Казинцев, Д. А. Алдырев. – Машиностроение, 1970.

2. Фоминский, Л. П. Наплавка рабочих органов сельхозмашин с помощью электронного ускорителя / Л. П. Фоминский, А. Ф. Левчук, М. В. Вайсман и др. // Свароч. Пр-во. – № 11.– С. 12–15.

3. Радченко, М. В. Структура и свойства индукционных и электронно-лучевых наплавок из порошковых материалов // Металловедение и термич. обраб. металлов. –1987. – № 7. – С. 58–59.

4. Иванайский, В. В. Особенности моделирования тепловых процессов в деталях с переменным поперечным сечением при комбинированном способе индукционной наплавки / В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, А. В. Ишков, С. М. Шанчуров, Е. М. Таусенев // Ползуновский вестник». – 2012. – № 1/1. – С. 98–105.

5. Тимошенко, В. П. Измерение тока индуктора при индукционной наплавке / В. П. Тимошенко, В. В. Иванайский, О. И. Хомутов // Ползуновский вестник». – 2012. – № 1/1. – С. 291–296.

6. Балаганский, А. Ю. Упрочнение длинномерных рабочих органов сельхозтехники односторонней автоматической индукционной наплавкой / А. Ю. Балаганский, В. В. Иванайский, Н. Т. Кривочуров, В. П. Тимошенко, А. С. Шайхудинов, А. В. Ишков. // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – № 7 (81). – С. 89–93.

7. Тимошенко, В. П. Индукционная наплавка лемехов с регулируемым тепловложением / В. П. Тимошенко, Н. В. Королев // Сварочное производство. – № 10. – С. 22.

8. Боль, А. А. Оптимизация процесса индукционной наплавки / А. А. Боль, В. Н. Коваль, В. П. Тимошенко, С. П. Лесков, В. П. Шерышев // Известия СО АН СССР. Сер. Техн. Наук. – 1985. – № 10, вып. 2. – С. 86–92.

9. Боль, А. А. Повышение качества индукционной наплавки путем оптимизации и автоматизации нагрева / А. А. Боль, В. П. Тимошенко, В. Н. Коваль // Известия СО АН СССР. Сер. Техн. Наук. – 1989. – вып. 1. – С. 85–90.

10. Тимошенко, В. П. Программирование режимов индукционной наплавки долотообразных лемехов / В. П. Тимошенко, А. А. Боль, С. П. Лесков // Автоматическая сварка. – 1989. – № 10. – С. 73–74.

11. Шерышев, В. П. Численное решение задачи нелинейного теплообмена двух тел с условием сопряжения типа сосредоточенной теплоемкости / В. П. Шерышев, И. Н. Панкратова, В. П. Тимошенко // В кн.: Автоматизация научных исследований. – Алма-Ата, 1982. – С. 191–202.

***Тимошенко Владимир Петрович**, к.т.н., доцент кафедры МБСП, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», e-mail: timvlad53@mail.ru.*

***Шерышев Валерий Павлович**, д.т.н., профессор, ООО «ГАЦ АР НАКС», e-mail: timvlad53@mail.ru.*