

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКЕ С УЧЕТОМ ПРИРАЩЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Т.С. Скобло, д-р техн. наук, профессор; А.А. Науменко, канд.
техн. наук, профессор; А.В. Харьяков, инженер, ассистент;

А.Д. Маргынченко, канд. техн. наук, ст. преподаватель

ХГТУСХ

(г. Харьков, Украина)

Method of modeling of temperature fields at plasma welding

In the article model of the plasma welding process is presented. Results of temperature fields calculations are considerable.

Одним из основных направлений совершенствования ремонтного производства является сокращение продолжительности, повышение качества и снижение стоимости ремонта. Использование прогрессивных методов восстановления деталей позволяет повысить их износостойкость, сократить продолжительность и стоимость ремонта машин, увеличить межремонтный период.

Значительная часть деталей, механизмов и машин выходит из строя из-за различного рода механических повреждений. К ним относится изменение свойств поверхностного слоя и структуры, например, трещины, риски, выкрашивание, изменение твердости [1].

Одной из существенных причин выхода из строя машин и оборудования являются поломки, а также различные виды износа, в первую очередь, в парах трения. Согласно данным фирмы "Кастолин" (Швейцария), стоимость простоев, вызванных этими причинами, составляет в металлургии и металлообрабатывающей промышленности 13%, электротехнической – 15%, в текстильной – 16%, в химической 18% от общих затрат в эксплуатации. Изготовление запасных частей для автомобилей и сельскохозяйственной техники требует столько же металла, сколько производство новых машин [2].

На период эксплуатации приходится наибольшая доля затрат, связанных с производством и использованием машин. Например, для тракторов затраты на техническое обслуживание и ремонт за весь срок службы более чем в два раза превышают их первоначальную стоимость [3].

Существует большое разнообразие методов ремонта деталей, вышедших из строя в результате изменения геометрических параметров и физико-механических свойств при износе. Из всего разно-

образия можно выделить методы нанесения покрытий на восстанавливаемую поверхность с помощью наплавки [4, 5]. Наплавка характеризуется высокой производительностью, а также прочным сцеплением наплавляемого материала с подложкой [4]. В настоящее время предпочтение отдается методам плазменной наплавки. Данный метод характеризуется относительной дешевизной, простотой применения. Одним из критериев выбора способа восстановления является величина перегрева восстанавливаемой детали. Эта проблема касается и метода плазменной наплавки, хотя и в меньшей степени [5].

Целью данной работы является создание математической модели процесса плазменно-порошковой наплавки стальных валов, адекватно описывающей реальные процессы, происходящие при обработке и позволяющей определить ее оптимальные режимы.

Рассматривалось расплавление порошка под воздействием потока ионизированных частиц (плазмы) и дальнейшая передача тепла вглубь основного металла. Происходящие при наплавке физические процессы до конца не изучены. Можно предположить, что под воздействием теплового потока расплавленные частицы образуют конвективные потоки, связанные с магнитными полями плазмы и гидравлическим воздействием инертного газа (аргона), удерживающие поток ионизированных частиц от большого рассеяния.

При этом математическая постановка задачи теплопроводности при наплавке цилиндрических поверхностей будет иметь вид (1). Требуется решить уравнение в цилиндрических координатах

$$c\gamma \frac{dT}{d\tau} = \lambda \left(\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right) + K_1 \frac{dT}{dx} + K_2 \frac{dT}{dr} + W(x, r), \quad (1)$$

где $T = T(x, r, \tau)$ – температура в точке с координатами x, r в момент времени τ , °С; C – коэффициент теплоемкости, зависящий от температуры $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$; γ – теплопроводность, зависящая от температуры,

$\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{град}}$; τ – время, с; x, r – координаты, мм; K_1, K_2 – коэффициенты конвективного переноса, $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$; W – источник тока, $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}$.

Рассматриваемая область – часть цилиндра радиусом от R_0 до R (радиус цилиндра) шириной a .

При задании исходных условий необходимо учитывать, что в процессе наплавки валика на поверхность детали с каждым новым

витком происходит приращение температуры перед дугой по фронту наплавки, определяемой по зависимости [6,7]

$$T = \frac{q}{R^2 \cdot c_p \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{e^{-\frac{\xi^2 \cdot n^2}{4 \cdot \tau_n}}}{\sqrt{\tau_n}},$$

где q — величина мощности дуги, Дж/см; R — радиус шейки конического вала, см;

$$F(r, t) = e^{-(\mu_1)^2 \cdot \tau} + e^{-(\mu_2)^2 \cdot \tau} + e^{-(\mu_3)^2 \cdot \tau} + \dots$$

функция распространения тепла по радиусу шейки цилиндра; τ — безразмерная продолжительность наплавки; $\xi = B/H$ — отношение ширины наплавляемого валика к шагу наплавки; μ — корни функции Бесселя первого рода нулевого порядка.

Начальным условием является заданная температура предварительного подогрева t_0 (в работе 200°C) всей рассматриваемой области

$$T(x, r, 0) = T_0. \quad (4)$$

Граничными условиями являются отсутствие теплового потока в точке $x=0$

$$\frac{dT}{dx} = 0 \Big|_{x=0}, \quad (5)$$

отсутствие теплового потока в точке $x=a$

$$\frac{dT}{dx} = 0 \Big|_{x=a}, \quad (6)$$

отсутствие теплового потока на глубине $r=R_1$

$$\frac{dT}{dr} = 0 \Big|_{r=R_1}. \quad (7)$$

При $r=R$ (в величину R входит и толщина порошка) принимается граничное условие второго рода [3]

$$\lambda \frac{dT}{dr} = Q(x, v, \tau, T) \Big|_{r=R}. \quad (8)$$

Q — удельный тепловой поток ($\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$), зависящий от координаты x , времени τ , линейной скорости v (м/с) и температуры (после плазменной обработки идет охлаждение на воздухе по закону Ньютона; см. ниже).

Время (τ_1), за которое пройдет пятно через рассматриваемое сечение, легко рассчитать:

$$\tau_1 = \frac{d}{v}, \quad (9)$$

где d – эффективный диаметр пятна (м); v – линейная скорость движения детали (м/с).

Суммарный тепловой поток на стадии плавления ($\tau \leq \tau_1$) рассчитывается по формуле [12]

$$Q_c = \frac{I \cdot U \cdot 0.243 \cdot 3.6 \cdot \eta}{F \cdot \delta}, \quad (10)$$

где I – ток, А; U – напряжение, В; η – КПД; σ – диаметр струи плазмы, м; $F\sigma$ – площадь струи плазмы, м².

Этот поток распределяется по эффективному диаметру пятна по произвольному закону $Q_1(x, v\tau)$, но так чтобы

$$QF\delta = \iint_{fd} Q_1(x, v\tau) dx d(v\tau), \quad (11)$$

где интегрирование распространяется на эффективную площадь пятна.

При такой постановке (11) в уравнении (1) можно отбросить слагаемое $K_1 \frac{dT}{dx}$.

$$\lambda \frac{dT}{dr} = k \cdot \left[\left(\frac{T + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cp} + 273}{100} \right)^4 \right] \bigg|_{r=R}, \quad (12)$$

где k – коэффициент, учитывающий степень черноты, теплоемкость и конвективный теплообмен (7,9); T_{cp} – температура окружающей среды, °С.

Скрытая теплота плавления учитывалась [9] по следующей методике:

$$C = \begin{cases} C_{ж}, & \text{если } T > T_l \\ \frac{C_{ж} + C_{т}}{2} + \frac{\rho}{T_l - T_s}, & \text{если } T_l \geq T \geq T_s \\ C_{т}, & \text{если } T < T_s \end{cases}, \quad (13)$$

где T_l , T_s – температуры ликвидуса и солидуса; $C_{ж}$, $C_{т}$ – теплоемкость жидкости и твердой фазы; ρ – скрытая теплота плавления, ($\rho=65$ ккал/кг).

Поскольку для полного решения задачи (1) необходимо привлекать уравнения магнитной динамики, гидродинамики и электродинамики (для определения) K_2 и $W(x, r)$ и точность такого решения весьма сомнительна, слагаемое $W(x, r)$ в данной работе было отброшено, а коэффициент K_2 подбирали из расчета, чтобы за время τ_1 расплавлялось 2 мм порошка, как это имеет место на самом деле.

Решение задачи (1), (3) – (12) с учетом принятых ограничений производили на компьютере по явной разностной схеме. Область разбивалась горизонтальными линиями i по радиусу неравномерно (возле границы R сетка сгущалась), а также вертикальными j равномерно с шагом Δx . В разностном виде уравнение выглядит так (индекс k относится к моменту времени K):

$$C_{ijk} \cdot \gamma_{ijk} \cdot \frac{T_{ijk+1} - T_{ijk}}{\Delta \tau} = \lambda_{ijk} \left(\frac{T_{ij-1k} - 2T_{ijk} + T_{ij+1k}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i-1jk} - 2T_{ijk} + T_{i+1jk}}{\Delta r_i^2} + \frac{1}{\sum_{l=1}^i \Delta r_l} \cdot \frac{T_{i+1jk} - T_{i-1jk}}{(r_i + r_{i-1})} \right) + K_i \frac{T_{i+1jk}}{\Delta r_i}, \quad (14)$$

где $\Delta \tau$ – шаг по времени, выбираемый из условия устойчивости [10]; разностной схемы $\Delta \tau \leq \min \left(\frac{C_{ijk} \cdot \gamma_{ijk} \cdot \Delta r_i^2}{\lambda_{ijk}} \right)$; Δr_i – переменный шаг по радиусу r ; K_i – коэффициент конвективного переноса, принимается равным нулю для твердой фазы.

Из (14) температура в момент времени $K+1$ находилась по формуле (для твердой фазы $K_i=0$)

$$T_{ijk+1} = T_{ijk} + \frac{\lambda_{ijk} \Delta \tau}{C_{ijk} \gamma_{ijk}} \cdot \left(\frac{T_{ij-1k} - 2T_{ijk} + T_{ij+1k}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i-1jk} - 2T_{ijk} + T_{i+1jk}}{\Delta r_i^2} + \frac{1}{\sum_{l=1}^i \Delta r_l} \cdot \frac{T_{i+1jk} - T_{i-1jk}}{r_i + r_{i-1}} \right). \quad (15)$$

Для жидкой фазы от величины T_{ijk+1} , полученной по (15), вычитали конвективное слагаемое, а к T_{i-1jk} добавляли

$$T_{ijk+1}^* = T_{ijk+1} - K \cdot \frac{T_{ijk} - T_{i-1jk}}{\Delta r_{i-1}},$$

$$T_{i-1jk+1} = T_{i-1jk+1} + K \cdot \frac{T_{ijk} - T_{i-1jk}}{\Delta r_{i-1}}. \quad (16)$$

Тем самым сохраняется консервативность схемы (соблюдается принцип сохранения энергии) и ее устойчивость, так как расчет ведется против потока [10].

Рассмотрим расчет в граничных точках.

Для условия (5)

$$\frac{T_{ij-1} - T_{ijk}}{\Delta x} = 0;$$

отсюда $T_{ij+1k+1} = T_{ijk} \quad (j=2).$ (17)

Аналогично для условия (6)

$$T_{ij+1k+1} = T_{ij} \quad (j=n-1);$$
 (18)

для условия (7)

$$T_{i-1jk+1} = T_{ijk} \quad (i=2);$$
 (19)

для условия (8) при $\tau \leq \tau_1$

$$\lambda_{i-1} \cdot \frac{T_{i+1jk+1} - T_{ijk}}{\Delta r_{i-1}} = Q(i,k),$$

отсюда

$$T_{i+1jk+1} = T_{ijk} + \frac{Q(i,k) \cdot \Delta r_{i-1}}{\lambda_{i-1}} \quad (i=m-1).$$
 (20)

Аналогично при $\tau < \tau_1$

$$T_{i+1jk+1} = T_{ijk} - \frac{\Delta r_{i-1}}{\lambda_{i-1}} \cdot K \cdot \left[\left(\frac{T_{ijk} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cp} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (i=m-1).$$
 (21)

Значения температур в граничных точках, определенные по зависимостям (17) – (21), подставляли в уравнение (15) для расчета температур в предграничных точках.

Для оценки глубины проплавления слоя решали уравнение теплопроводности

$$c_p \frac{dT}{d\tau} = \lambda \cdot \left(\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d^2 T}{dr} \right)$$
 (22)

с граничными условиями (4), (5), (6), (7) и условием первого рода на границе "деталь – наплавленный металл".

$$T = T_l \Big|_{r=R-2}$$

Расчет по разностной схеме производили по формуле (15).

Расчет показал, что высота проплавленного слоя при выходе из зоны действия пятна составила 0,125 мм.

Расчеты производили для токов $I=230 \cdot 1$, $I=230 \cdot 1,5$, $I=230 \cdot 1,225$, $I=230 \cdot 1,3$, а также оборотов детали при наплавке $n_0=2,8$ об/мин, $n_0=2,8 \cdot 1,2$, $n_0=2,8 \cdot 1,1$, $n_0=2,8 \cdot 1$, $n_0=2,8 \cdot 0,91$; $n_0=2,8 \cdot 0,83$ при

$I=230 \cdot 1,15$. (Для удобства приводится не истинное значение режимов, а коэффициент их увеличения.)

Результаты расчетов представлены на рисунке 1.

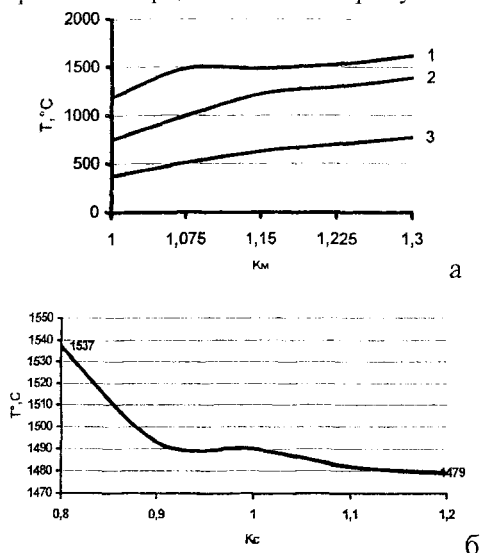


Рис. 1. Зависимость парного взаимодействия: а) максимальной температуры на поверхности металла и мощности плазмотрона, б) температуры на поверхности детали от линейной скорости источника тепла; где T – температура, $^{\circ}\text{C}$; K_m и K_c – коэффициенты изменения мощности

Результаты проведенных расчетов согласуются с данными, полученными экспериментально [9] путем металлографического анализа образцов наплавленных деталей и измерением твердости микротвердости.

Особенностью разработанной модели является существенный учет конвективных тепловых потоков в жидкой фазе и температур приращения перед дугой по фронту наплавки. Построение такой модели позволяет прогнозировать структуру (и, как следствие, свойства) наплавленного слоя и детали и гибко оперировать режимами плавки для получения необходимых свойств изделия.

Произведенные расчеты показали, что регулирование толщины расплавленного слоя эффективнее производить изменением скорости плазменной дуги, чем мощности источника нагрева. Расчеты подтвердили возможность регулирования нагрева величиной значен

ния мощности мало влияет на толщину наплавленного слоя. Выявлена возможность формирования диапазона скоростей, в котором изменение величины наплавленного слоя не поддается регулированию.

Проведен сопоставительный анализ данных, полученных расчетным и экспериментальным путями. Показано, что данная модель адекватно отображает тепловые процессы, которые имеют место при наплавке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стальниченко О.И., Кравцов Т.Г., Крылов С.В. Новые методы восстановления деталей и использование их в судоремонте. – М.: В/О "Мортехинформреклама", 1987.
2. Авдеев М.В., Воловик Е.Л., Ульман И.Е. Технология ремонта машин и оборудования. – М.: Агропромиздат, 1986.
3. Кравцов Т.Г., Сторожев В.П. Восстановление деталей при ремонте судов. – М.: Транспорт, 1981. – 119 с.
4. Рьжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. – Киев: Наукова думка, 1994.
5. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Порошковые плазменные покрытия. – Киев: Техніка, 1986.
6. Нефедов Б.Б., Щепкин Д.Л. Тепловые расчеты при плазменно-порошковой наплавке // Сварочное производство. – 1991. – №12.
7. Нефедов Б.Б., Лялякин В.П. Расчет режима плазменно-порошковой наплавки валов // Сварочное производство. – 1993. – №6.
8. Тихонов А.Н., Салярский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966.
9. Салярский А.А., Можеенко И.А. Экономическая схема сквозного счета задачи кристаллизации // Вычислительная математика и математическая физика. – 1965. – №7.
10. Роуч П.Дж. Вычислительная гидродинамика / Пер. с англ. В.А. Гущина, В.Я. Митниченко; Под. ред. П.И. Чушкина. – М.: Мир, 1980.
11. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Харьяков А.В. и др. Обеспечение необходимых показателей качества и надежности коленчатых валов, восстановленных плазменным методом // Высокоэффективные технологии в машиностроении. – Киев, 1998.
12. Теоретические основы сварки / Под. ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1970.