

ВАРИАНТ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

Глушко С.П.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар

Ключевые слова: математическая модель, тепловая задача, электродуговое напыление, контроль температуры, условия теплообмена, металлосодержащие покрытия.

Аннотация. Работа посвящена исследованию технологии электродугового напыления и математическому моделированию теплового процесса электродугового напыления, используемого для защиты от коррозии, износа, повышения скольжения в парах трения, создания токопроводящих слоев, восстановления изношенных поверхностей и решения других технических задач. Для обеспечения контроля температуры и оптимизации параметров предложен вариант математической модели теплового процесса этой технологии.

A VARIANT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE THERMAL PROCESS OF ELECTRIC ARC SPRAYING

Glushko S.P.

Kuban State Technological University, Krasnodar

Keywords: mathematical model, thermal problem, electric arc spraying, temperature control, heat exchange conditions, metal-containing coatings.

Abstract. The work is devoted to the study of electric arc spraying technology and mathematical modeling of the thermal process of electric arc spraying, used to protect against corrosion, wear, increase sliding in friction pairs, create conductive layers, restore worn surfaces and solve other technical problems. To ensure temperature control and parameter optimization, a variant of the mathematical model of the thermal process of this technology is proposed.

Нанесение различных металлосодержащих покрытий методом электродугового напыления на стальные заготовки новых деталей машин и при восстановлении размеров изношенных стальных деталей.

Применение этой технологии снижает металлоемкость деталей машин и повышает их эксплуатационные характеристики. Объединение в одной детали разных по своей физико-химической природе металлов или сплавов позволяет получить новые качества, которыми не обладают исходные материалы. Электродуговым напылением можно наносить покрытия на детали с плоской и криволинейной поверхностью.

Для напыления антикоррозионных (протекторных) покрытий используют цинк (Zn), алюминий (Al), сплав цинк-алюминий (Zn-Al 85/15).

Для напыления восстановительных и износостойких покрытий используют углеродистые и легированные стали, нержавеющей стали, бронзы, баббиты, медь.

Тепловые процессы электродугового напыления характеризуются комплексом параметров, определяющих подвод энергии, ее аккумуляцию заготовкой, тепловые потери и, в конечном итоге, формирование температурного поля заготовки [1-3].

Для оценки оптимальных параметров теплового процесса электродугового напыления и обеспечения контроля температуры процесса предложен вариант математической модели теплового процесса. Разработке математической модели предшествовал анализ теплового процесса электродугового напыления.

Напыляемая стальная заготовка имеет призматическую форму (рис. 1). Тепловая задача нестационарная, нелинейная. Толщина слоя напыления составляет 0,1-0,3 мм, поэтому можно пренебречь его толщиной и перепадом температуры по слою. Через верхнюю поверхность, на которую наносится покрытие, тепло передается излучением и конвекцией.

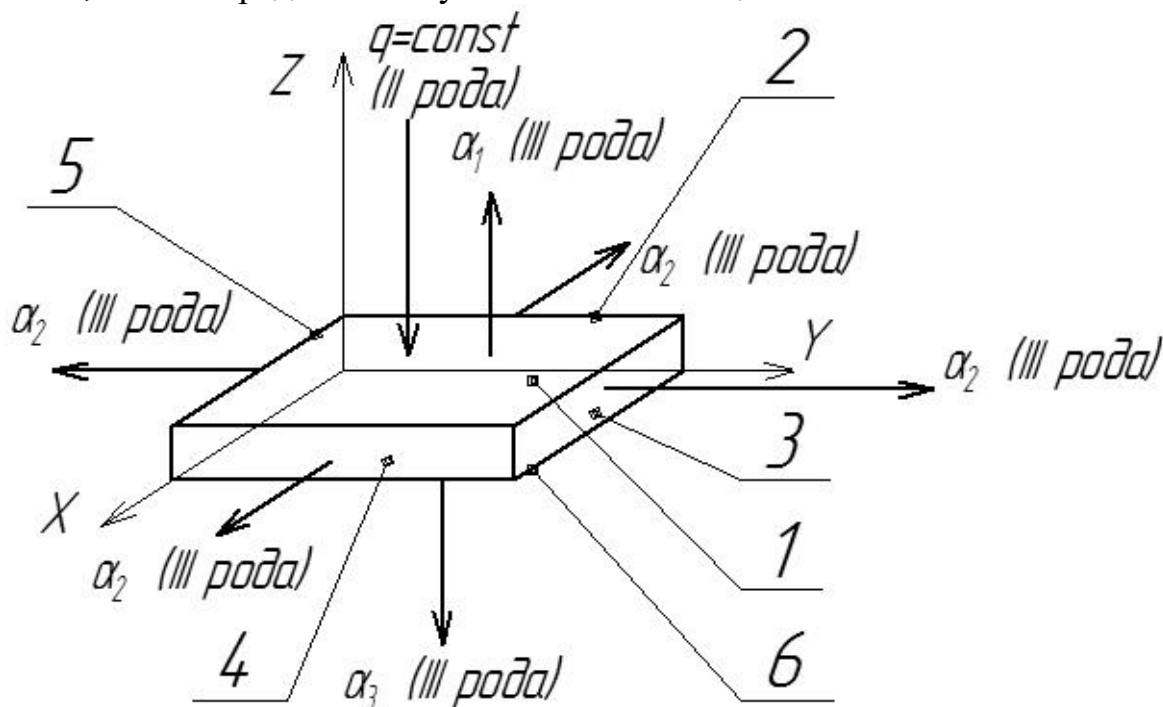


Рис. 1. Тепловая задача процесса электродугового напыления

При формировании граничных условий были приняты следующие допущения:

- на верхней поверхности призматической заготовки моделируем сложный теплообмен: теплообмен излучением от внешнего источника – $q = \text{const}$ и теплообмен по закону Ньютона (граничные условия третьего рода) с эквивалентным коэффициентом теплообмена [4-6];

- на границе контакта заготовки и поверхности рабочего стола моделируем граничные условия третьего рода – по закону Ньютона, с эквивалентным коэффициентом теплообмена [1, 2];

- четыре наружные боковые поверхности призматической заготовки отдают тепло окружающей среде конвекцией и излучением. Моделируем теплообмен по закону Ньютона (граничные условия третьего рода) с эквивалентным коэффициентом теплообмена [1, 2].

Эквивалентные коэффициенты теплообмена задаем на основе рекомендаций, полученных из источников [4-6]. Далее будем их корректировать, сопоставляя расчетные и экспериментальные термограммы.

Стадии нагрева и охлаждения отличаются граничными условиями на верхней поверхности заготовки. При охлаждении на этой поверхности граничные

условия III, при нагреве тепловые условия моделируются сочетанием граничных условий второго рода $q = \text{const}$ и третьего рода.

Тепловой поток на поверхности $l = 0$

$$q = \frac{N}{S}, \quad (1)$$

где N – мощность электрической дуги, Вт; S – площадь поверхности заготовки, м².

Равномерное распределение теплового потока $q = \text{const}$ на всей верхней поверхности заготовки имитирует распространение тепла электрического разряда, движущегося от края до края со скоростью не менее $v = 0,086$ м/с, так как значение числа Пекле Pe допускает такую имитацию. Качественно модель нагрева соответствует реальному процессу.

С учетом этих предположений и при заданном режиме движения источника тепла (электрической дуги) математическая модель теплового процесса электродугового напыления на стадиях нагрева и охлаждения описывается условиями (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq x \leq b; 0 \leq y \leq d; 0 \leq z \leq \delta; \\ \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda(T)}{\rho(T) \cdot C(T)} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \\ 0 < t < \bar{t}; T(t, x, y, z) = T_0, \\ 1. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} |_{z = \delta} = -q + \alpha_1 (T|_{z = \delta} - T_0), \\ 2. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} |_{x = 0} = -\alpha_2 (T|x = 0 - T_0), \\ 3. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} |_{y = d} = \alpha_2 (T|y = d - T_0), \\ 4. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} |_{x = b} = \alpha_2 (T|x = b - T_0), \\ 5. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} |_{y = 0} = -\alpha_2 (T|y = 0 - T_0), \\ 6. \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} |_{z = 0} = -\alpha_3 \Delta T |_{z = 0} \end{array} \right. \quad (2)$$

Здесь и дальше q – плотность теплового потока на верхней поверхности заготовки, Вт/м²; $\bar{t}$ – общее время процесса напыления, включающее стадии нагрева и охлаждения, с; t – текущее время, с; ΔT – перепад температур на стыке заготовки и поверхности стола установки, К; b – ширина заготовки, м; d – длина заготовки, м; δ – толщина заготовки, м; α_1 – эквивалентный коэффициент теплообмена на верхней поверхности заготовки, Вт/(м²·К); α_2 – эквивалентный коэффициент теплообмена на боковых поверхностях заготовки, Вт/(м²·К); α_3 – эквивалентный коэффициент теплообмена на стыке заготовки и поверхности стола установки, Вт/(м²·К); $\lambda(t)$ – теплопроводность, Вт/(м·К); $C(t)$ – теплоемкость, Дж/(кг·К); $\rho(t)$ – плотность, кг/м³; T_0 – начальная температура системы в заданной точке пространства и времени, К.

Отметим, что в предложенной системе уравнений при переходе к другому материалу заготовки соответственно меняются теплофизические характеристики

($\lambda = \lambda(T)$, $C = C(T)$, $\rho = \rho(T)$), а также эквивалентные коэффициенты теплообмена $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

Система уравнений (2) при заданных теплофизических характеристиках материалов ($\lambda = \lambda(T)$, $C = C(T)$, $\rho = \rho(T)$) и при каждом значении управляемого параметра t решается численно с использованием явной конечно-разностной схемы.

Заготовку разделяем на ряд элементарных участков (слоев), каждый из которых считается пространственно-однородным в отношении температуры, скорости нагрева и охлаждения. Поскольку используется квазиравновесная схема модели, выделение тепла фазового перехода не учитывается [1]. В пределах каждого расчетного участка уравнения нестационарной теплопроводности заменяются совокупностью алгебраических уравнений. Производные по времени и координатам в этих уравнениях заменяются конечными приращениями. Расчетный шаг по времени $\Delta t = 0,1$ с удовлетворяет условию устойчивости явной схемы расчета.

Для оценки величин, входящих в граничные условия, были проанализированы работы, в которых решались задачи радиационно-конвективного теплообмена. В этих задачах принято оценивать потери тепла с помощью эквивалентных коэффициентов теплообмена. Значение эквивалентного коэффициента теплообмена для наружных поверхностей заготовки на основе работ [1, 2] предварительно приняли равным $\alpha_1 = \alpha_2 = 90 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Поскольку сведений об эквивалентных коэффициентах теплообмена α_3 на стыке заготовки и поверхности рабочего стола нет, то для первоначальной оценки обратились к задачам литья в кокиль. Теплообмен в зазоре $0,05\text{--}0,1$ мм между отливкой и кокилем в наибольшей степени соответствует условиям теплообмена в зоне контакта фланец-втулка. На основе работ [1, 2] до уточнения реальных значений принимается $\alpha_3 = 950 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. В ходе численных экспериментов должна быть выполнена корректировка граничных условий при сопоставлении расчетных и экспериментальных термограмм.

Список литературы

1. Сапожников С.З. Разработка и внедрение технологии производства биметаллических заготовок методом совместного нагрева: Автореф. дисс. ...докт. техн. наук. – Свердловск, 1988. – 54 с.
2. Глушко С.П., Поправка Д.Л., Абрамов Н.С. Моделирование теплового процесса центробежной биметаллизации внутренней поверхности втулок // Сварочное производство. – 2009. – №2. – С. 30-35.
3. Глушко С.П. Аналитическое моделирование теплового источника при наплавке стальной втулки центробежным методом с использованием осесимметричной электрической дуги // Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). – 2025. – Т. 25, №2. – С. 83-90.
4. Самойлович Ю.А. Системный анализ кристаллизации слитка. – Киев: Наукова думка, 1983. – 248 с.
5. Шмрга Л. Затвердевание и кристаллизация стальных слитков / Пер. с чеш. – М.: Металлургия, 1985. – 248 с.
6. Карножицкий В.Н. Контактный теплообмен в процессах литья. – Киев: Наукова думка, 1978. – 300 с.

Сведения об авторе:

Глушко Сергей Петрович – к.т.н., доцент, доцент кафедры инженерии систем управления, материалов и технологий в машиностроении.