

Математическое моделирование особенностей нагрева цилиндрической поверхности при плазменном напылении

В.И. Богданович¹, М.Г. Гиорбелидзе¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Разработана математическая модель определения температуры в системе покрытие-основа при плазменном напылении порошкового материала на внутреннюю цилиндрическую поверхность. Математическая модель учитывает трансформацию теплового источника Гаусса, скорость относительного движения плазматрона и угол плазменной струи по отношению к напыляемой поверхности. Проанализировано влияние технологических параметров напыления на теплонапряженность процесса и качество плазменных покрытий.

1. Введение

Технология плазменного газотермического напыления покрытий находит все более широкое применение при производстве различных изделий машиностроения. В данной технологии происходит формирование твердого тела последовательным наложением слоев порошковых материалов, нагретых до определенной температуры в условиях термомеханических воздействий. Плазменный газотермический метод получил достаточное распространение ввиду его универсальности и возможности создания защитных и функциональных покрытий на поверхности изделий из различных материалов [1-12].

2. Постановка математической модели процесса нагрева цилиндрической поверхности при плазменном напылении

В процессе нанесения покрытия плазматрон перемещается с некоторой постоянной скоростью V относительно поверхности напыляемого изделия, которое, в свою очередь, для обеспечения равномерности нанесения покрытия вращается с постоянной скоростью ω . Угол наклона плазматрона к поверхности γ также остается постоянным. Истекающая из плазматрона струя газа с расплавленными частицами нагревает напыляемую цилиндрическую поверхность до некоторой температуры. Для получения качественного покрытия необходимо технологическими приемами обеспечить температуру нагрева детали в процессе наращивания покрытия в некотором диапазоне от T_{\min} до T_{\max} .

Для рассматриваемого случая, ввиду того что $\frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}} \ll 1$ сложное уравнение теплопроводности для системы покрытие-подложка может быть представлено двумя

отдельными уравнениями теплопроводности в цилиндрических координатах для материала подложки ($i = 2$) и для материала покрытия ($i = 1$) с постоянными значениями теплофизических параметров, равными средним значениям соответствующих параметров в указанном узком диапазоне температур:

$$\frac{1}{a_i^2} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где T_i - температура материала в момент времени t ; a_i - коэффициент температуропроводности материала; r, z, φ - цилиндрические координаты.

Уравнения теплопроводности (1) для подложки и покрытия дополняются начальными условиями:

$$T_i(r, z, \varphi, 0) = T_0, \quad (2)$$

где T_0 - температура в начальный момент времени.

Граничное условие 4-рода в зоне контакта подложки и покрытия:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad T_1 = T_2 \quad \text{при } r = R, \quad (3)$$

где λ_i - коэффициент теплопроводности; R - радиус поверхности раздела между подложкой и покрытием.

Граничное условие на внешней поверхности описывает теплообмен подложки с окружающей средой:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha_2 (T_{c,2} - T_2) \quad \text{при } r = R_2, \quad (4)$$

где T_c - температура окружающей среды; α_2 - коэффициент теплообмена подложки с окружающей средой.

Граничное условие на поверхности, подвергающейся воздействию плазменной струи и участвующей в образовании покрытия соответствуют г.у. 3-рода. Однако, как показывают экспериментальные исследования [3], условиями конвективного теплообмена в данном случае можно пренебречь. В связи с этим, граничные условия будут включать в себя только задание потока к данной поверхности, т.е. преобразуются в г.у. 2-рода:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -q(z, \varphi, t), \quad (5)$$

где q - плотность теплового потока.

Выражение для плотности теплового потока в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$q_\gamma = \frac{N}{2\pi\sigma_z\sigma_\varphi} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{z-Vt}{\sigma_z} \right)^2 + \left(\frac{R(\varphi-\omega t)}{\sigma_\varphi} \right)^2 \right] \right\}; \quad (6)$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_0}{\cos\gamma} \left(1 + \frac{z-Vt}{l} \sin\gamma \right);$$

$$\sigma_\varphi = \sigma_0 \left(1 + \frac{z-Vt}{l} \sin\gamma \right),$$

где V – линейная скорость вдоль оси z .

3. Заключение

Разработана математическая модель, учитывающая особенности нагрева цилиндрической поверхности при плазменном напылении. Проанализировано влияние на теплонпряженность процесса и качество плазменных покрытий технологических параметров напыления, таких как

частота вращения цилиндра, скорость перемещения плазматрона и угол наклона плазменной струи. Разработаны технологические рекомендации на процесс нанесения покрытий на внутреннюю цилиндрическую поверхность.

4. Литература

- [1] Барвинок, В.А. Плазма в технологии, надежность, ресурс – М.: Наука и технологии, 2005. – 452 с.
- [2] Барвинок, В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий – М: Машиностроение, 1990. – 384 с.
- [3] Барвинок, В.А. Математическое моделирование и физика процессов нанесения плазменных покрытий из композиционных лакированных порошков / В.А. Барвинок, В.И. Богданович, И.А. Докукина – М.: МЦНТИ, 1998. – 96 с.
- [4] Бобров, Г.В. Теория и технология формирования неорганических покрытий / Г.В. Бобров, А.А. Ильин, В.С. Спектор – М.: Альфа-М, 2014. – 925 с.
- [5] Бобров, Г.В. Нанесение неорганических покрытий / Г.В. Бобров, А.А. Ильин – М.: Интернет-Инжиниринг, 2004. – 624 с.
- [6] Ильющенко, А.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А.Ф. Ильющенко, А.И. Шевцов, В.А. Оковитый – Минск: Беларус. Навука, 2011. – 357 с.
- [7] Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления – М.: Издательство МГТУ, 2003. – 458 с.
- [8] Барвинок, В.А. Физическое и математическое моделирование процесса формирования мезоструктурно-упорядоченных плазменных покрытий / В.А. Барвинок, В.И. Богданович // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 52. – С. 105-112.
- [9] Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
- [10] Кудинов, В.В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / В.В. Кудинов, В.М. Иванов – М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.
- [11] Кудинов, В.В. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко – М.: Наука, 1990. – 408 с.
- [12] Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия / М. Хокинг, В. Васантасри, П. Сидки – М.: Мир, 2000. – 518 с.
- [13] Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский – М.: Наука, 1972. – 682 с.

Mathematical modeling of features of heating of a cylindrical surface at plasma spraying

V.I. Bogdanovich¹, M.G. Giorbelidze¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. A mathematical model for determining the temperature in the coating-base system during plasma deposition of powder material on the inner cylindrical surface has been developed. The mathematical model takes into account the transformation of the Gauss heat source, the speed of relative motion of the plasma torch and the angle of the plasma jet with respect to the sputtered surface. The influence of technological parameters of sputtering on the heat stress of the process and the quality of plasma coatings is analyzed.