

Таким образом, получены аналитические выражения (9)...(13), позволяющие рассчитать величину магнитной индукции и ее градиент в любой точке пространства рабочей зоны.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект №Т99М-007.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов Н.В. Квадратичные формы и матрицы. – М.: Наука, 1972. – 159 с.
2. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. Ч3. Теория электромагнитного поля. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.2. – М.: Энергия, 1966. – 407с.

УДК 621.792

Ж. А. Мрочек, А. П. Ракомсин, Л. М. Кожуро, Д. Н. Хилько

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ

*Белорусская государственная политехническая академия
Государственное предприятие «МАЗ»
Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Беларусь*

Процесс формирования покрытия при электромагнитной наплавке (ЭМН) объединяет явления различной физической природы. К числу важнейших следует отнести структурные и фазовые превращения, условия протекания которых определяет структуру и физико-механические свойства покрытий. Формирование покрытия прежде всего связано с процессами кристаллизации и охлаждения капель расплава частиц ферропорошка при их взаимодействии с основой.

Решение задачи кристаллизации жидкой частицы при ЭМН точными аналитическими методами не предоставляется возможным [1]. Это обусловлено нелинейностью граничных условий, конечными размерами тел, изменением теплофизических свойств покрытия и основы. Поэтому для изучения теплообмена в контакте основы с жидкой каплей расплава порошка воспользуемся приближенным методом А.И. Вейника [2].

Рассмотрим задачу кристаллизации и охлаждения жидкой частицы порошка на основе. Математическая модель процесса кристаллизации и охлаждения жидкой

частицы включает в себя систему уравнений, описывающих температурное поле в покрытии и основе, начальные условия (распределение температуры по сечению тел в начальный момент времени), граничные условия теплового взаимодействия системы тел основа–покрытие–окружающая среда, геометрические параметры (размеры, конфигурация) и теплофизические свойства взаимодействующих тел.

Пусть в момент времени $t_0=0$ жидкий расплав, имеющий температуру кристаллизации T_m , соприкасается с массивной основой, имеющей начальную температуру T_0 (рис.1). Теплоотдачу в окружающую среду не учитываем. Тогда поля температур в затвердевшем объеме покрытия и основы можно представить в виде следующих функций [2]:

$$T_1 = -\left(T_m - T_k\right)\left(\frac{x}{x_1}\right)^{n_1} + T_m;$$

$$T_2 = \left(T_k - T_0\right)\left(\frac{x}{x_2}\right)^{n_2} + T_0,$$

где x_1 – толщина закристаллизовавшейся капли к моменту времени t ; x_2 – глубина прогретого слоя основы в тот же момент времени; T_k – температура в точке контакта; T_m – температура кристаллизации жидкого расплава; n_1 и n_2 – параметры кривой.

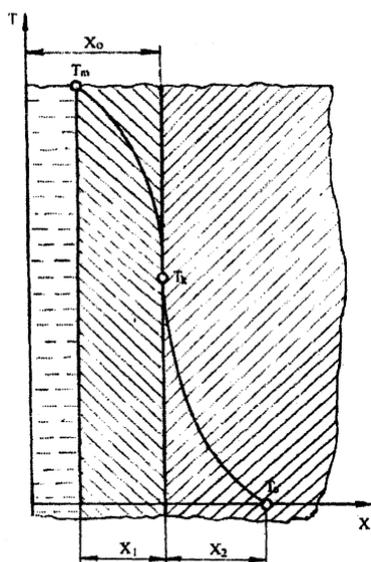


Рис. 1. Схема распределения температуры в сечениях покрытия и основы.

Точка контакта находится в тепловом равновесии, т.е.

$$dQ_1 = dQ_2. \quad (1)$$

Уравнение теплового баланса для единицы длины формируемого покрытия имеет следующий вид:

$$dQ_1 = dQA_1 + dQ_m. \quad (2)$$

Левая часть уравнения (2) выражает накопление теплоты в покрытии сечением F в единицу времени

$$dQ_1 = \lambda_1 n_1 \frac{T_m - T_k}{x_1} F dt,$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности материала частицы.

Первый член правой части уравнения (2) представляет собой количество аккумулированной теплоты покрытием сечением F :

$$dQ_{A1} = \frac{1}{n_1 + 1} F \rho_1 C_1 (T_m - T_k) dx_1,$$

где ρ_1, C_1 – соответственно плотность и теплоемкость материала частицы.

Второй член правой части уравнения (2) равен количеству теплоты кристаллизации покрытия сечением F

$$dQ_m = FL \rho_1 dx_1,$$

где L – скрытая теплота кристаллизации.

Уравнение теплового баланса нагрева основы можно представить как

$$dQ_2 = dQA_2. \quad (3)$$

Левая часть уравнения (3) представляет собой накопление теплоты в основе в единицу времени:

$$dQ_2 = \lambda_2 n_2 \frac{T_m - T_k}{x_2} F dt,$$

где λ_2 – коэффициент теплопроводности материала основы.

Правая часть уравнения (3) выражает количество аккумулированной теплоты основой:

$$dQ_{A2} = \frac{1}{n_2 + 1} \rho_2 C_2 (T_k - T_o) dx_2,$$

где ρ_2, C_2 – соответственно плотность и теплоемкость материала основы.

Равенство (1) можно переписать в виде:

$$\lambda_1 n_1 \frac{T_m - T_k}{x_1} = \lambda_2 n_2 \frac{T_k - T_o}{x_2} \quad (4)$$

или

$$\frac{1}{n_1 + 1} \rho_1 C_1 (T_m - T_k) + L \rho_1 x_1 = \frac{1}{n_2 + 1} \rho_2 C_2 x_2 (T_k - T_o). \quad (5)$$

Выразив из (4) разность температур и подставив в (5), получим следующее квадратное уравнение:

$$\beta v^2 - \gamma v - (1 + \gamma) = 0, \quad (6)$$

где приняты следующие обозначения:

$$\beta = \frac{1}{k_\varepsilon^2} \frac{n_2 (n_1 + 1)}{n_1 (n_2 + 1)}; \quad k_\varepsilon = \frac{\sqrt{\lambda_1 C_1 \rho_1}}{\sqrt{\lambda_2 C_2 \rho_2}}; \quad v = \frac{\lambda_1 n_1 x_2}{\lambda_2 n_2 x_1}; \quad \gamma = (n_1 + 1) \frac{L}{C_1 (T_m - T_o)}.$$

Решению уравнения (6) соответствует корень

$$v = \frac{\gamma + \sqrt{\gamma^2 + 4\beta(1 + \gamma)}}{2\beta}.$$

Так как $v = \text{const}$, то постоянной будет и температура контактной поверхности, определяемая выражением

$$T_k = \frac{v T_m + T_o}{1 + v}.$$

Запишем дифференциальное уравнение теплового баланса для покрытия:

$$\lambda_1 n_1 \frac{T_m - T_k}{x_1} dt = \frac{1}{n_1 + 1} \rho_1 C_1 (T_m - T_k) dx_1 + L \rho_1 dx_1. \quad (7)$$

Интегрируя (7), получим полное время кристаллизации слоя расплава толщиной x_o

$$t = \left[\frac{1}{n_1 (n_1 + 1)} + \frac{L}{n_1 C_1 (T_m - T_k)} \right] \frac{x_o^2}{2a_1}, \quad (8)$$

где $a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 C_1}$.

На основании полученных выражений (1)...(7) с помощью пакета прикладных программ MATHCAD PLUS 6.0 и MATHEMATICA 2.2 осуществили расчет термического цикла контакта капле расплава частиц различных ферропорошков с основой. Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3.

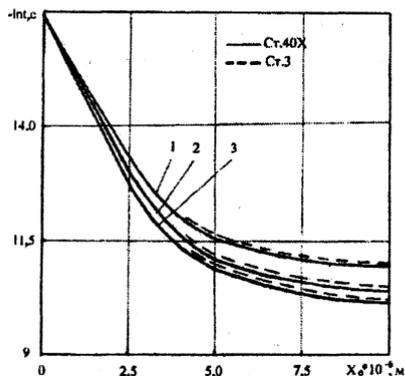


Рис. 2. Продолжительность кристаллизации капле расплава частиц ферропорошков Сталь45-1%В (1), Fe-9%В (2), Р6М5 (3) по толщине покрытия

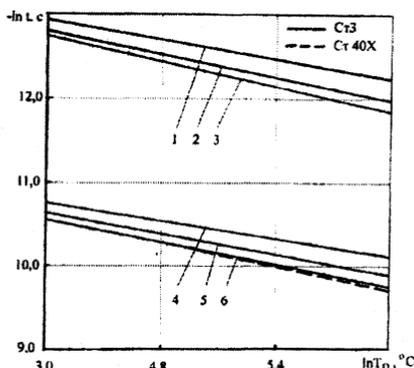


Рис. 3. Зависимость времени кристаллизации капле расплава частиц ферропорошков Сталь45-1%В (1, 4), Fe-9%В (2, 5), Р6М5 (3, 6) от начальной температуры основы для различных толщин частицы: 1, 2, 3 - $1\text{Ч}10^{-6}$ м, 4, 5, 6 - $1\text{Ч}10^{-5}$ м.

Анализ последних показывает, что продолжительность кристаллизации капле расплава порошка находится в степенной зависимости от величины начальной температуры основы T_0 . При кристаллизации капле различной толщины характер этой зависимости не изменяется. Как следует из выражения (8), аналогичное влияние на изменение временного интервала кристаллизации капле оказывает ее начальная температура T_m .

Таким образом, приведенные результаты позволяют количественно оценить влияние основных теплофизических параметров материалов покрытия и основы на продолжительность цикла термического взаимодействия. Изменяя путем варьирования данных параметров интенсивность теплового потока в направлении плоскости контакта капли расплава с основой, можно получить требуемое время кристаллизации, что создает предпосылки для регламентированного управления процессом ЭМН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Есьман Р.И., Бахмат В.А., Королев В.М. Теплофизика литейных процессов. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 144 с.
2. Вейник А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 184 с.