

эммитеров и катодов с организованной пространственной структурой, а также в качестве исходных материалов при плазменной металллизации и нанесении тугоплавких покрытий и при выращивании монокристаллов.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что кристаллизация сферических частиц вольфрама высокой чистоты в вакууме в процессе свободного ладения происходит при значительных скоростях охлаждения расплава, что способствует формированию своеобразной структуры внутри и на поверхности частиц, а также определяет некоторые особенности физико-механических и технологических свойств получаемых порошков.

### Л и т е р а т у р а

1. Ходосевич В.Г., Спиридонов Н.В., Шевцов А.И. Исследование процесса электротермического оплавления покрытий из самофлюсующихся сплавов. – В сб.: Машиностроение и приборостроение. Мн., 1977, вып. 9. 2. Кобяков О.С., Михайлов С.М., Петушков Е.Е. Некоторые особенности удаления примесей при электронной зонной плавке вольфрама и молибдена. – В сб.: Металлические монокристаллы, получение и исследование свойств. М., 1976. 3. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов и тугоплавких металлов / В.С.Раковский, А.Ф.Силаев, В.И.Ходкин, О.Х.Фаткуллин. – М., 1974.

УДК 621.81.004.67

В.Г.Ходосевич, канд. техн. наук (БПИ),  
А.И.Шевцов, канд. техн. наук (БПИ),  
Г.Г.Еженков, инженер (БПИ)

### АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКЕ

При наплавке деталей машин в условиях производства возникает необходимость обоснованного нормирования наплавочной операции с определением машинного и вспомогательного времени.

Цель предлагаемой работы заключается в анализе условий формирования покрытия при индукционной наплавке порошковой шихтой с выводом расчетной зависимости для определения длительности периода затвердевания наплавленного металла от параметров процесса.

При использовании шихты, состоящей из смеси порошкового самофлюсующегося сплава и флюса на основе буры, покрытие формируется в такой последовательности. Вначале поверхностный слой подложки нагревается до температуры, превышающей температуру плавления металлической части шихты. Плавится флюс, смачивая подложку и частицы порошкового сплава. Завершается период нагрева образованием жидкой ванны сплава на подложке. При этом флюс, растворив оксидные включения, всплывает на поверхность расплава и образует слой шлака, изолирующий поверхность расплава от контакта с воздухом.

После отключения индукционного нагрева начинается период затвердевания жидкого сплава на подложке. Процесс формирования покрытия по данной технологии характеризуется условиями однозначности, учет которых позволяет упростить математический аппарат исследований. К этим условиям относятся: наличие идеального контакта между наплавленным слоем и подложкой; отсутствие потерь теплоты с поверхности металлической жидкой ванны; аккумуляция более массивной подложкой всей теплоты затвердевания покрытия.

Количество теплоты ( $q$ ), выделяющееся при затвердевании единицы поверхности наплавленного слоя, равно:

$$q = q_{\text{пер}} + q_{\text{з}} = \xi_1 c_1 \gamma_1 (T_{\text{ж}} - T_{\text{з}}) + \xi_1 \gamma_1 \rho_1, \quad (1)$$

где  $q_{\text{пер}}$  — теплота перегрева расплава, Дж/м<sup>2</sup>;  $q_{\text{з}}$  — теплота кристаллизации, Дж/м<sup>2</sup>;  $c_1$  — удельная теплоемкость сплава, Дж/кг·К;  $\gamma_1$  — плотность сплава, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_1$  — удельная теплота кристаллизации сплава, Дж/кг;  $\xi_1$  — толщина наплавленного слоя, м;  $T_{\text{ж}}$  — максимальная температура жидкой ванны, К;  $T_{\text{з}}$  — температура затвердевания расплава, К.

Количество теплоты, аккумулированное подложкой ( $q_{\text{ак}}$ ), определяется из дифференциального уравнения Фурье, которое связывает скорость передачи теплоты с температурным градиентом по сечению подложки:

$$\frac{\partial q_{\text{ак}}}{\partial \tau} = -\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2)$$

где  $\tau$  — время затвердевания наплавленного металла, с;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала подложки, Вт/м·К;  $x$  — текущая координата по сечению подложки, начало которой находится на границе подложка—покрытие, м.

Решение задачи о затвердевании металла с использованием дифференциального уравнения (2) возможно лишь в случае ис-

пользования вышеприведенных условий однозначности, характеризующих данный конкретный процесс наплавки. Для случая идеального контакта температурный градиент равен:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -T_k \frac{e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}}{\sqrt{\pi a \tau}}, \quad (3)$$

где  $T_k$  - температура контакта подложка - покрытие, К;  $a$  - коэффициент температуропроводности материала подложки,  $m^2/c$ ,

$$a = \frac{\lambda_2}{c_2 \delta_2}.$$

После подстановки (3) в (2) и дифференцирования полученного уравнения найдем выражение, связывающее количество аккумулированной теплоты с параметрами наплавки. Имеем

$$q_{ак} = 2\sqrt{\frac{\lambda_2 c_2 \delta_2}{\pi}} \cdot T_k \sqrt{\tau}. \quad (4)$$

Составим уравнение теплового баланса:

$$q_{ак} = q_{пер} + q_3. \quad (5)$$

Или

$$2\sqrt{\frac{\lambda_2 c_2 \delta_2}{\pi}} T_k \sqrt{\tau} = \xi_1 c_1 \delta_1 (T_{ж} - T_3) + \xi_1 \delta_1 \rho_1. \quad (6)$$

Выразим зависимость времени затвердевания наплавленного слоя от теплофизических свойств материала и технологических параметров наплавки

$$\sqrt{\tau} = \frac{\xi_1 c_1 \delta_1 (T_{ж} - T_3) + \xi_1 \delta_1 \rho_1}{2\sqrt{\frac{\lambda_2 c_2 \delta_2}{\pi}} T_k}. \quad (7)$$

Итак, нами получена расчетная зависимость времени затвердевания наплавленного слоя от теплофизических и технологических параметров процесса наплавки. Формула может быть использована для количественной оценки времени выдержки деталей в позиции наплавки после отключения индуктора ТВЧ, что немаловажно для обоснованного нормирования технологического процесса наплавки в крупносерийном и массовом производстве.