

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ ПРИ НАПЫЛЕНИИ

Решение задачи получения деталей напылением порошков связано с оценкой тепловых взаимодействий (плазменная струя — частица) в двухфазном потоке, которые определяют степень проплавления частиц и режим их распыления. При рассмотрении этих условий необходимо прежде всего определить температурное поле системы частица — плазменная струя в течение всего процесса распыления.

Предположим, что частица имеет сферическую форму радиуса $R_ч$, температура по всему ее объему распределяется равномерно и в момент ввода в плазменную струю на срезе сопла плазмотрона составляет T_{01} , а распределение температуры вдоль оси струи плазмы соответствует параболической закономерности, которая имеет вид

$$T_c = T_{o.c} - (T_{o.c} - T_{п.с}) \left(\frac{x}{X_{п.с}} \right)^n, \quad (1)$$

где T_c — температура плазмы в определенном сечении струи; $T_{o.c}$ и $T_{п.с}$ — температура плазмы соответственно на срезе сопла плазмотрона и на подложке; x — расстояние от рассматриваемого сечения до среза сопла плазмотрона; $X_{п.с}$ — расстояние от среза сопла плазмотрона до подложки; n — показатель степени параболической кривой распределения температуры по длине плазменной струи, который определяется из экспериментальных зависимостей [1, 2].

Решение задачи будем осуществлять при условии постоянства теплофизических коэффициентов системы. Рассмотрим начальную стадию процесса, когда нагреваемая частица порошка находится в плазменной струе. Дифференциальное уравнение теплового баланса такого процесса будет включать количество теплоты dQ_a , подведенное к частице от потока плазмы, и количество аккумулированной материалом частицы теплоты $dQ_{ак}$:

$$dQ_{ак} = V_ч \gamma_1 c_1 dT_1, \quad (2)$$

где $V_ч$ — объем частицы: $V_ч = \frac{4}{3} \pi R_ч^3$; $R_ч$ и T_1 — радиус и температура частицы; γ_1 и c_1 — плотность и удельная эффективная теплоемкость материала частицы.

Удельная эффективная теплоемкость частицы

$$c_1 = c_ч + \frac{r_{пл}}{T_{пл} - T_{01}}, \quad (3)$$

где $c_ч$ и $r_{пл}$ — удельная теплоемкость и теплота плавления материала частицы;

$T_{пл}$ и T_{01} — температура плавления и начальная температура частицы.

Элементарное количество теплоты, подведенной к поверхности частицы за время $d\tau$, определяется соотношением

$$dQ_a = a_1 F_{\text{ч}} (T_c - T_1) d\tau, \quad (4)$$

где a_1 — коэффициент теплоотдачи от плазменного потока к поверхности частицы; $F_{\text{ч}}$ — площадь поверхности частицы: $F_{\text{ч}} = 4\pi R_{\text{ч}}^2$.

Время τ и расстояние от частицы до среза сопла плазмотрона x связаны закономерностью

$$\tau = x/v_{\text{ч}}, \quad (5)$$

где $v_{\text{ч}}$ — скорость движения частицы.

Скорость перемещения частицы в плазменной струе обычно изменяется. При расчетах можно приближенно принять $v_{\text{ч}}$ постоянной на определенном участке потока и использовать ее среднее интегральное значение.

Дифференциальное уравнение теплового баланса процесса имеет вид

$$V_{\text{ч}} \gamma_1 c_1 dT_1 = \frac{a_1}{V_r} F_{\text{ч}} [T_{\text{о.с}} - (T_{\text{о.с}} - T_{\text{н.с}}) \left(\frac{x}{X_{\text{н.с}}} \right)^n - T_1] dx. \quad (6)$$

Подставив в выражение (6) значения $V_{\text{ч}}$ и $F_{\text{ч}}$ и осуществив некоторые преобразования, получаем линейное дифференциальное уравнение

$$\frac{dT_1}{dx} + pT_1 = Q, \quad (7)$$

где

$$p = \frac{3a_1}{v_{\text{ч}} R_{\text{ч}} \gamma_1 c_1}; \quad Q = \frac{3a_1}{V_{\text{ч}} R_{\text{ч}} \gamma_1 c_1} [T_{\text{о.с}} - (T_{\text{о.с}} - T_{\text{н.с}}) \left(\frac{x}{X_{\text{н.с}}} \right)^n].$$

Решение уравнения (7) имеет вид

$$T_1 = e^{-\int p dx} [\int e^{\int p dx} Q dx + C]. \quad (8)$$

После интегрирования выражения (8), проведения некоторых преобразований и упрощений и определения постоянной C при условии $x = 0, T_1 = T_{01}$ находим зависимость температуры частицы от параметров процесса и расстояния от нее до среза сопла плазмотрона:

$$T_1 = T_{\text{о.с}} - (T_{\text{о.с}} - T_{\text{н.с}}) \left(\frac{x}{X_{\text{н.с}}} \right)^n - (T_{\text{о.с}} - T_{01}) e^{-\frac{3a_1}{v_{\text{ч}} R_{\text{ч}} \gamma_1 c_1} x}. \quad (9)$$

Соотношения (9) и (5) позволяют определять температуру частицы в различные моменты нагрева при движении в плазменной струе.

Окончанию процесса прогрева частицы и началу ее охлаждения соответст-

вует момент достижения материалом частицы определенной температуры $T_1 = T_{ч.с}$. При $T_{ч.с} = \text{const}$ $\frac{dT_{ч.с}}{dx} = 0$, а из выражения (9) после его дифференцирования получаем соотношение для определения протяженности периода нагрева частицы в зависимости от характеристик процесса:

$$x_{ч.с} = \frac{X_{п.с}}{2a} (\sqrt{b^2 - 4ac} - b), \quad (10)$$

$$\text{где } a = \frac{3a_1 X_{п.с}}{v_ч R_ч \gamma_1 c_1};$$

$$b = \ln \frac{(T_{о.с} - T_{п.с}) n v_ч R_ч \gamma_1 c_1}{(T_{о.с} - T_{01}) 3a_1 X_{п.с}} + \frac{3a_1 X_{п.с}}{v_ч R_ч \gamma_1 c_1} + 2(n-1);$$

$$c = \ln \frac{(T_{о.с} - T_{п.с}) n v_ч R_ч \gamma_1 c_1}{(T_{о.с} - T_{01}) 3a_1 X_{п.с}} - 2(n-1).$$

Продолжительность нагрева частицы до начала охлаждения $\tau_{ч.с}$ определяется из совместного решения выражений (5) и (10). Из соотношения (9) при известном $x_{ч.с}$ легко найти температуру $T_{ч.с}$. При определении температуры частицы T_1 с использованием удельной эффективной теплоемкости материала (3) предполагается, что плавление частицы происходит на протяжении всего промежутка $x_{ч.с}$.

Начиная с момента $\tau = \tau_{ч.с}$, происходит охлаждение расплавленной частицы. Уравнение теплового баланса процесса имеет вид

$$-V_ч \gamma_1' c_1' dT_1' = a_1 F_ч (T_с - T_1') d\tau, \quad (11)$$

где T_1' — температура расплавленной частицы; γ_1' и c_1' — плотность и удельная теплоемкость расплавленного материала частицы.

В результате подстановок значений $T_с$ и τ уравнений (1) и (5) уравнение (11) приводится к виду (7):

$$\frac{dT_1'}{dx} - \frac{3a_1}{v_ч R_ч \gamma_1' c_1'} T_1' = - \frac{3a_1}{v_ч R_ч \gamma_1' c_1'} [T_{о.с} - (T_{о.с} - T_{п.с}) \left(\frac{x}{X_{п.с}}\right)^n]. \quad (12)$$

Проинтегрировав соотношение (12) и определив постоянную C , получаем зависимость температуры расплавленной частицы от режимов процесса охлаждения:

$$T_1' = T_{о.с} - (T_{о.с} - T_{п.с}) \left(\frac{x}{X_{п.с}}\right)^n - [(T_{о.с} - T_{ч.с}) - (T_{о.с} - T_{п.с}) x$$

$$x \left(\frac{x_{ч.с}}{X_{п.с}} \right)^n] e^{\frac{3a_1 (x-x_{ч.с})}{v_4 R_4 \gamma_4^2 c_1}} \quad (13)$$

Температура частицы в момент соприкосновения с подложкой характеризуется выражением

$$T_{ч.п} = T_{п.с} - [(T_{о.с} - T_{ч.с}) - (T_{о.с} - T_{п.с}) \left(\frac{x_{ч.с}}{X_{п.с}} \right)^n] e^{\frac{3a_1 (X_{п.с} - x_{ч.с})}{v_4 R_4 \gamma_4^2 c_1}} \quad (14)$$

Полученные зависимости позволяют осуществлять расчет тепловых условий взаимодействия частиц порошка с плазменным потоком в течение всего процесса перемещения от плазмотрона до подложки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейник А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. — М., 1959. — 184 с.
2. Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. — М., 1982. — 192 с.

УДК 621.743

Д.М.КУКУЙ, В.А.СКВОРЦОВ

ОБ УЛУЧШЕНИИ ВЫБИВАЕМОСТИ ЖИДКОСТЕКОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ПРИРОДНЫМИ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Одним из эффективных методов улучшения выбиваемости жидкостекольных смесей из отливок является модифицирование жидкого стекла порошкообразными органоминеральными добавками, в качестве которых используются сланцевые материалы [1, 2]. При этом абсолютные значения работы выбивки смесей, прогретых при различных температурах, зависят от химического состава используемого сланца. Так, например, если применение в составе жидкостекольной смеси сланцевой породы (Л), содержащей 5,4 % органических веществ и 94,6 % минеральных составляющих, не позволяет существенно изменить работу выбивки в интервале температур 200–400 °С, то использование керогена-70 (Кр), содержащего 70,3 % органических веществ, дает возможность максимально снизить ее после прогрева смеси при этих температурах. И наоборот, для улучшения выбиваемости жидкостекольных смесей, прогреваемых до более высоких температур (выше 600–800 °С), целесообразно использовать порошки либо прибалтийского сланца (Лр) с содержанием в минеральной части 50–60 % CaO, либо сланцевой породы с 70 % CaO, способные в этом температурном диапазоне образовывать трехкомпонентные крем-