

Н.А. Свидунович (канд.техн.наук),
В.П. Грибкова (канд.физ.-мат.наук),
Л.В. Новосельская (канд.техн.наук), А.И. Гарост

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ

Опыты показывают, что плазма способна ввести в металл азот в количестве, значительно превышающем равновесие для обычных условий [1].

Проводились исследования [2] обработки металла на желобе в процессе разлива его из печи. Установлено, что такой способ продувки расплавленного металла струей низкотемпературной азотной плазмы имеет ряд недостатков.

Наиболее перспективным методом в интенсификации тепло- и массообмена оказалось применение закрученного потока.

В данной работе рассматривается математическая модель, описывающая процесс обработки пленки расплавленного металла струей низкотемпературной плазмы с учетом механического взаимодействия между потоками.

Рассматривается двумерная задача. Кривизна пленки не учитывается, так как толщина ее во много раз меньше радиуса сосуда. Систему координат расположим следующим образом: вертикальная ось x совпадает с линией раздела фаз плазма - металл и направлена вниз. Горизонтальная ось y направлена от стенки к границе раздела фаз.

Гидродинамика течения газа описывается в приближении теории пограничного слоя системой уравнений переноса и неразрывности:

в плазме

$$\left\{ \begin{aligned} U_{\text{п}} \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial x} + V_{\text{п}} \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial y} &= - \frac{dP}{dx} \frac{1}{\rho_{\text{п}}} \sin \alpha + \\ &+ \frac{1}{\rho_{\text{п}}} \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{\text{п}} \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial y} \right]; \\ \frac{\partial U_{\text{п}}}{\partial x} + \frac{\partial V_{\text{п}}}{\partial y} &= 0; \end{aligned} \right. \quad (1)$$

в металле

$$\left\{ \begin{aligned} U_{\text{м}} \frac{\partial U_{\text{м}}}{\partial x} + V_{\text{м}} \frac{\partial U_{\text{м}}}{\partial y} &= - \frac{dP}{dx} \frac{1}{\rho_{\text{м}}} \sin \alpha + \\ &+ g \sin \alpha + \frac{1}{\rho_{\text{м}}} \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{\text{м}} \frac{\partial U_{\text{м}}}{\partial y} \right]; \\ \frac{\partial U_{\text{м}}}{\partial x} + \frac{\partial V_{\text{м}}}{\partial y} &= 0; \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где x, y - продольная и поперечная координаты в декартовой системе; $U_{\text{м}}, V_{\text{м}}$ - осевая и радиальная составляющие скорости металла, м/с; $\rho_{\text{п}}, \rho_{\text{м}}$ - плотность плазмы и металла, кг/м³; P - давление в системе, кг/м²; $\mu_{\text{п}}, \mu_{\text{м}}$ - коэффициенты динамической вязкости плазмы и металла, $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$; α - угол, под которым вводится поток, град.

Учитывая, что процесс протекает при нормальном давлении, можно считать, что $\frac{dP}{dx} = 0$.

Теплообмен в газе и металле при условии малых времен контакта [1] и отсутствия испарения металла с поверхности контакта с газом будет описываться уравнениями следующего вида:

$$\left\{ \begin{aligned} U_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial x} + V_{\text{п}} \frac{\partial T}{\partial y} &= a_{\text{п}} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}; \\ U_{\text{м}} \frac{\partial t}{\partial x} + V_{\text{м}} \frac{\partial t}{\partial y} &= a_{\text{м}} \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где T и t - температура в газе и металле.

Считая, что насыщение металла азотом не влияет существенно на состав плазмы, можно рассчитывать распределение концентраций только для пленки металла, т.е.

$$U_M \frac{\partial c_N}{\partial x} + V_M \frac{\partial c_N}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c_N}{\partial y^2}, \quad (4)$$

где c_N - средняя концентрация азота в пленке металла.

Толщина пленки металла определяется из условия равенства расхода металла по длине x :

$$G_M = \rho_M \int_0^{\delta} U dy.$$

Граничные условия на стенке, т.е. при $y = 0$, будут иметь вид:

условие прилипания

$$U_M(0) = V_M(0) = 0; \quad (5)$$

условие теплоизолированности стенки

$$\frac{\partial t}{\partial y} = 0; \quad (6)$$

условие непроницаемости массы через твердую поверхность

$$\frac{\partial c}{\partial y} = 0. \quad (7)$$

На границе раздела фаз при $y = \delta(x)$ должны выполняться следующие условия:

равенство скоростей

$$U_M(\delta) = U_{II}(\delta); \quad (8)$$

равенство касательных напряжений

$$\mu_M \left. \frac{\partial U_M}{\partial y} \right|_{\delta} = \mu_{II} \left. \frac{\partial U_{II}}{\partial y} \right|_{\delta}; \quad (9)$$

условие отсутствия фазового перехода на границе раздела фаз

$$U_M(\delta) \frac{d\delta}{dx} - V_M(\delta) = 0; \quad (10)$$

равенство тепловых потоков

$$\lambda_M \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{\delta} = \lambda_{\Pi} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\delta}, \quad (11)$$

где λ_M, λ_{Π} - теплопроводность металла и плазмы, отсутствие температурного скачка

$$t(\delta) = T(\delta); \quad (12)$$

условие насыщения металла газом [4]

$$c_N = 0,79 \sqrt{P_{N\Pi}}, \quad (13)$$

где $P_{N\Pi}$ - парциальное давление азота в плазме.

В потоке можно принять, что

$$U_{\Pi}(\infty) = U_{\infty} = \text{const}, \quad (14)$$

т.е. скорость газа постоянна, изменение температуры по длине x (известная функция [3])

$$T_{\infty} = T(x). \quad (15)$$

Система уравнений (1) - (4) должна решаться совместно при учете граничных условий (5) - (13).

В ы в о д

Таким образом, статья преследует цель обсуждения постановки задачи по обработке пленки расплавленного металла струей низкотемпературной плазмы в закрученном потоке с прямоочным движением фаз.

Л и т е р а т у р а

1. Лакомский В.И. Плазменно-дуговой переплав. Киев, 1974, с. 171.
2. Будыка С.Х. и др. К вопросу о продувке движущегося потока жидкости газовой струей. - ДАН БССР, 1975, 19, №7, с. 630.
3. Краснов А.Н. и др. Низкотемпературная плазма в металлургии. М., 1970, с. 23.