

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ОБОЛОЧКИ ПОРОШКОВОЙ ЛЕНТЫ

Бережная Е. В., Кассов В. Д., Турчанин М. А., Малыгина С. В., Мартыновская Е. В.

Проанализировано тепловое состояние оболочки порошковой ленты на различных ее участках по длине свободного вылета, изучены причины неравномерности ее плавления. С учетом распределения сварочного тока по сечению порошковой ленты предложена математическая модель для расчета нагрева вылета порошковой ленты. Разработана математическая модель нагрева оболочки порошковой ленты. Получены математические зависимости для расчета температуры оболочки по длине вылета, удобные для практического использования и позволяющие определить зависимость температуры нагрева вылета оболочки от плотности сварочного тока, размеров, коэффициента заполнения и теплофизических свойств порошковой ленты.

Проаналізовано тепловий стан оболонки порошкової стрічки на різних її ділянках по довжині вільного вильоту, вивчено причини нерівномірності її плавлення. З урахуванням розподілення зварювального струму по перетину порошкової стрічки запропоновано математичну модель для розрахунку нагріву вильоту порошкової стрічки. Розроблено математичну модель для розрахунку нагріву вильоту порошкової стрічки. Отримано математичні залежності для розрахунку температури оболонки по довжині вильоту, які є зручними для практичного використання та дозволяють визначити залежність температури нагріву вильоту оболонки від щільності зварювального струму, розмірів, коефіцієнту заповнення та теплофізичних властивостей порошкової стрічки.

The heat condition of a powder tape shell in different areas on free length of electrode is analyzed, the matters of unevenness of its melting are investigated. The mathematical model for calculating the heat of free length of powder tape with accounting of distribution of welding current on section of powder tape is offered. The mathematical model for heating reckoning of free electrode length is developed. Mathematical calculating dependences of shell temperature on free length suitable for practical use and allowing to define dependence of shell heat temperature from welding current capacity, sizes, coefficients of the filling, heat and physical characteristics of the powder tape are obtained.

Бережная Е. В.	канд. техн. наук, ассистент кафедры ОиТСП ДГМА sp@dgma.donetsk.ua
Кассов В. Д.	д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ПТМ ДГМА
Турчанин М. А.	д-р хим. наук, проф. кафедры ТОЛП ДГМА
Малыгина С. В.	канд. техн. наук, ст. преп. кафедры ПМ ДГМА
Мартыновская Е. В.	студент ДГМА

УДК 621.791.75.042

Бережная Е. В., Кассов В. Д., Турчанин М. А., Малыгина С. В., Мартыновская Е. В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ОБОЛОЧКИ ПОРОШКОВОЙ ЛЕНТЫ

Тепловое состояние системы «оболочка-сердечник» во многом определяет основные сварочно-технологические свойства порошковой ленты. Сердечник порошкового электрода необходимо рассматривать как статистический комплекс элементарных областей, в которых частицы взаимосвязаны не только с совершенно различными химическими, механическими, но и термическими свойствами. Каждая такая область – это сложный составной материал и закономерности управления тепловым состоянием системы «оболочка-сердечник» изучены недостаточно [1–3]. Известно, что плавление оболочки порошковой ленты и ее сердечника происходит неравномерно. Неравномерность плавления оболочки и сердечника порошковой ленты непосредственно зависит от распределения сварочного тока между оболочкой и сердечником. Как установлено в работах [4–6], электросопротивление сердечника в $3,2 \cdot 10^2 \dots 3,1 \cdot 10^3$ раз больше, чем электросопротивление металла оболочки. Поэтому сварочный ток протекает практически по оболочке порошковой ленты, а плотность тока в порошковой ленте можно рассчитывать по сечению оболочки.

С учетом распределения сварочного тока по сечению порошковой ленты предложена следующая модель для расчета нагрева вылета порошковой ленты. В основу модели положена расчетная схема Н. Н. Рыкалина [7], в которой учтены некоторые особенности теплового состояния, характерные для порошковой ленты: электрическое сопротивление шихты сердечника намного больше сопротивления оболочки порошковой ленты, поэтому сварочный ток проходит в основном через оболочку ленты, и плотность тока в порошковой ленте можно рассчитывать по сечению оболочки; при прохождении сварочного тока по порошковой ленте все тепло выделяется в ее оболочке. Выделившееся тепло идет на нагрев оболочки, сердечника и частично теряется через боковую поверхность порошковой ленты путем теплоотдачи в окружающую среду.

Целью работы является разработка математических зависимостей для расчета температуры оболочки по длине свободного вылета порошковой ленты.

В производстве сварочных и наплавочных материалов известны различные конструкции порошковых лент. Порошковая лента имеет оболочку, состоящую из одной или двух металлических лент, заполненную порошковым наполнителем. Конструкции порошковой ленты отличаются размерами и количеством замковых соединений, количеством металлических лент для формирования оболочки, их расположением. Изготавливают порошковые ленты следующих размеров: толщина 2...4 мм, ширина 6...60 мм. Для расчета теплового состояния вылета примем прямоугольную форму сечения порошковой ленты. Замковые соединения рассматриваемых конструкций учитываются при расчете площади сечения оболочки порошковой ленты. Для этого принимаем, что каждый замок образуется частью металлической ленты длиной l . Число слоев для каждой конструкции будет различно и равняется n .

Таким образом, будем считать, что каждая конструкция оболочки порошковой ленты образуется из прямоугольника с добавлением замкового соединения. Ширина v и толщина h сердечника взаимосвязаны с шириной и толщиной порошковой ленты через толщину оболочки δ . Тепловой баланс нагрева порошковой ленты сварочным током с учетом принятых допущений выражается уравнением:

$$Q = Q_0 + Q_c + Q_\delta, \quad (1)$$

где Q – джоулево тепло, выделившееся в оболочке на данном участке вылета;

Q_0 – приращение теплосодержания оболочки ленты;

Q_c – приращение теплосодержания сердечника порошковой ленты;

Q_δ – теплоотдача с боковой поверхности данного участка вылета в окружающую среду.

При прохождении тока в элементе Δl оболочки вылета за время dt выделится теплота:

$$Q = \frac{\rho \Delta l}{S_0} I^2 dt, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление материала оболочки, Ом·м;

S_0 – площадь поперечного сечения оболочки порошковой ленты, м²;

I – ток наплавки, А.

Накопление теплоты в элементе Δl сердечника вылета при увеличении температуры на dT в единицу времени за время dt составит:

$$Q_0 = c_0 \gamma_0 \frac{dT}{dt} S_0 \Delta l dt, \quad (3)$$

где c_0 и γ_0 – удельная теплоемкость (Дж/кг·град) и плотность (кг/м³) оболочки порошковой ленты.

Накопление теплоты в элементе Δl сердечника вылета при увеличении температуры шихты на dT_c в единицу времени за время dt составит:

$$Q_c = c_c \gamma_c \frac{dT_c}{dt} S_c \Delta l dt, \quad (4)$$

где c_c и γ_c – удельная теплоемкость (Дж/кг·град) и плотность (кг/м³) сердечника порошковой ленты.

Тепло, отдаваемое с боковой поверхности участка Δl вылета порошковой ленты за время dt , составит:

$$Q_\delta = \alpha(T - T_0) \Pi \Delta l dt, \quad (5)$$

где α – коэффициент теплообмена с окружающей средой, Вт/(м²·град);

T – температура нагрева порошковой ленты, град;

T_0 – температура окружающей среды, град;

Π – периметр порошковой ленты, м.

Подставляя значения Q, Q_0, Q_c, Q_δ в уравнение (1), получим:

$$c_0 \gamma_0 \frac{dT}{dt} S_0 = \frac{I^2}{S_0} \rho - c_c \gamma_c \frac{dT_c}{dt} S_c - \alpha(T - T_0) \Pi. \quad (6)$$

Поскольку средняя скорость нагрева сердечника порошковой ленты меньше скорости нагрева оболочки, то можно принять, что:

$$\frac{dT_c}{dt} = m \frac{dT}{dt},$$

где коэффициент $m < 1$.

Тогда уравнение (6) можно упростить. В итоге получим:

$$(c_0 \gamma_0 + m c_c \gamma_c \frac{S_c}{S_0}) \frac{dT}{dt} = \frac{I^2}{S_0^2} \rho - \alpha(T - T_0) \frac{\Pi}{S_0}.$$

Обозначая:

$$j = \frac{I}{S_0},$$

$$A = c_0 \gamma_0 + m c_c \gamma_c \frac{S_c}{S_0}, \quad (7)$$

получим:

$$A \frac{dT}{dt} = \rho j^2 - \alpha(T - T_0) \frac{\Pi}{S_0}. \quad (8)$$

Удельное сопротивление оболочки порошковой ленты является функцией температуры и описывается формулой:

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta T), \quad (9)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление при начальной температуре, Ом·м;

β – температурный коэффициент сопротивления оболочки, град⁻¹.

Подставляя (9) в уравнение (8), получим:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\rho_0 \beta j^2 - \alpha \Pi / S_0}{A} T + \frac{\rho_0 j^2 + \alpha \Pi T_0 / S_0}{A}. \quad (10)$$

Введем обозначения:

$$k = \frac{\rho_0 \beta j^2 - \alpha \Pi / S_0}{A};$$

$$B = \frac{\rho_0 j^2 + \alpha \Pi T_0 / S_0}{A}; \quad (11)$$

$$C = \frac{B}{k} = \frac{\rho_0 j^2 + \alpha \Pi T_0 / S_0}{\rho_0 \beta j^2 - \alpha \Pi / S_0}.$$

Тогда уравнение (10) можно записать в виде:

$$\frac{dT}{dt} = kT + B. \quad (12)$$

Решая дифференциальное уравнение (12) методом разделения переменных, получим:

$$T = \frac{B}{k} e^{kt} + T_0 e^{-kt} - \frac{B}{k}.$$

Используя обозначения (11), окончательно имеем:

$$T = T_0 + (C + T_0)(e^{kt} - 1). \quad (13)$$

Для определения температуры сечения вылета, расположенного на расстоянии L (м) от токоподвода, в формулу (13) необходимо подставить значения времени нагрева:

$$t = \frac{L}{v},$$

где v – скорость плавления (подачи) порошковой ленты, м/с.

Тогда последнее уравнение запишется в виде:

$$T = T_0 + (C + T_0)(e^{kL/v} - 1). \quad (14)$$

Коэффициент заполнения порошковой ленты K_3 определяется отношением массы шихты сердечника к общей массе единицы длины порошковой ленты:

$$K_3 = \frac{M_c}{M_0 + M_c} = \frac{\gamma_c S_c}{\gamma_0 S_0 + \gamma_c S_c}, \quad (15)$$

где M_c, M_0 – масса шихты и оболочки;

γ_c, γ_o – плотность сердечника (насыпной вес) и оболочки порошковой ленты.
Преобразуя формулу (15), получим:

$$K_3 = \frac{\gamma_c S_c / (\gamma_o S_o)}{1 + \gamma_c S_c / (\gamma_o S_o)}.$$

Найдем из последнего выражения величину отношения $\gamma_c S_c / (\gamma_o S_o)$. Имеем:

$$K_3 (1 + \gamma_c S_c / (\gamma_o S_o)) = \gamma_c S_c / (\gamma_o S_o).$$

Откуда:

$$\frac{\gamma_c S_c}{\gamma_o S_o} = \frac{K_3}{1 - K_3}. \quad (16)$$

Обозначим $K_c = \frac{K_3}{1 - K_3}$, т. е. K_c – это величина отношения массы сердечника к массе оболочки. Тогда формулу (7) для расчета коэффициента A можем преобразовать к такому виду:

$$A = \gamma_o (c_o + m K_c c_c), \quad (17)$$

а коэффициент k в формуле (14) можно определить из выражения:

$$k = \frac{\rho_o \beta j^2 - \alpha \Pi / S_o}{\gamma_o (c_o + m K_c c_c)}, \quad (18)$$

где $\Pi = 2(\varphi + h + 4\delta)$, м;

$$S_o = 2\delta(\varphi + h + 2\delta + \frac{hl}{2}), \text{ м}^2. \quad (19)$$

Построенная математическая модель теплового состояния вылета порошковой ленты (13) и выражения (17)–(19) для расчета параметров модели дают возможность определить зависимость температуры нагрева вылета оболочки от плотности сварочного тока, размеров, коэффициента заполнения и теплофизических свойств порошковой ленты.

ВЫВОДЫ

Проанализировано тепловое состояние оболочки порошковой ленты на различных ее участках по длине свободного вылета. Получены математические зависимости для расчета температуры оболочки по длине вылета, удобные для практического использования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патон Б. Е. Проблемы сварки на рубеже веков / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 1999. – № 1. – С. 4–15.
2. Рябцев И. А. Высокопроизводительная широкослойная наплавка электродными проволоками и лентами / И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2005. – № 6. – С. 36–41.
3. Походня И. К. Сварка порошковой проволокой / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков. – К. : Наукова думка, 1972. – 221 с.
4. Кассов В. Д. Наплавка порошковой лентой как эффективный метод повышения долговечности оборудования / В. Д. Кассов, В. В. Чигарев, В. В. Кадава // Захист металургійних машин від поломок. – Маріуполь, 2006. – № 5. – С. 262–265.
5. Кассов В. Д. Підвищення працездатності деталей наплавленням порошковим дротом / В. Д. Кассов, В. В. Чигарьов, О. П. Літвінов // Вісті Академії інженерних наук України. – 2008. – № 3. – С. 20–23.
6. Самсонов И. Г. Электросопротивление и нагрев порошковой проволоки / И. Г. Самсонов, Н. В. Королев // Сварочное производство. – 1981. – № 11. – С. 7–9.
7. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М. : Машгиз, 1951. – 296 с.

Статья поступила в редакцию 05.11.2011 г.