

УДК 536.24:621.036:621.793

НАГРЕВ ЧАСТИЦЫ В СТРУЕ ПРОПАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ПРИ АКТИВИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

*д-р техн. наук, проф. В.С. ИВАШКО, канд. техн. наук, доц. К.В. БУЙКУС
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск),*

*д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ
(Полоцкий государственный университет)*

Установлено расстояние, на котором частицы распыляемого материала при активированной дуговой металллизации находятся в расплавленном состоянии, обеспечивая образование плотного покрытия с высокой когезией.

Взаимодействие между частицей и газом при активированной дуговой металллизации проявляется в виде аэродинамической силы лобового сопротивления, действующей на частицу в направлении относительной скорости обтекания. Величина и направление силы лобового сопротивления определяется относительной скоростью обтекания частицы сплошной средой. Действием остальных сил можно пренебречь.

В пределах участка ΔL можно допустить, что частица движется равноускоренно под действием аэродинамической силы струи продуктов горения и тормозится аэродинамической силой лобового сопротивления неподвижной среды.

Уравнение баланса сил, действующих на частицу, в проекции на направление движения частицы следующее:

$$\vec{F}_w + \vec{F}_c + \vec{F}_j = \vec{F}, \quad (1)$$

где \vec{F}_w – сила сопротивления полету частицы в стоячем воздухе помещения; \vec{F}_c – аэродинамическая сила струи продуктов горения; \vec{F}_j – сила инерции частицы.

$$F_w = -sV_{cpx}^2 C_x \gamma, \quad (2)$$

где s – площадь поперечного сечения частицы, m^2 :

$$s = \pi R_x^2, \quad (3)$$

где R_x – радиус частицы расплавленного материала проволоки из равенства срывающих и удерживающих сил капли на конце проволоки перед ее срывом [1]:

$$C_x s \gamma \frac{V_0^2}{2} + mg = \pi d_{np} \sigma, \quad (4)$$

где γ – плотность струи:

$$\gamma = \frac{\gamma_n T_n}{T_{cpc} - \frac{V_{cpc}^2}{2g \frac{k}{k-1} R}}, \quad (5)$$

здесь γ_n , T_n – плотность продуктов горения и температура соответственно для окружающей струю среды помещения.

m – масса частицы:

$$m = \gamma_{np} \frac{4\pi R_x^3}{3}, \quad (6)$$

где γ_{np} – плотность материала частицы (проволоки), для стали $\gamma_{np} = 7872 \text{ кг/м}^3$ [2, с. 56, табл. 5.1] σ – поверхностное натяжение материала частицы, для стали $\sigma = 1,841 \text{ Дж/м}^2$ [3, с. 465]; V_{cpx} – средняя скорость частицы в пределах малого участка:

$$V_{cpx} = \frac{V_{nx} + V_{xx}}{2}, \quad (7)$$

где V_{nx} – скорость частицы в начале малого участка пути; $V_{кx}$ – скорость частицы в конце малого участка пути; C_x – коэффициент лобового сопротивления частицы, зависящий от числа Рейнольдса [4, с. 134]:

$$Re = \left[|V_{cpc} - V_{ctx}| 2R_x \right] / \vartheta, \tag{8}$$

где ϑ – кинематический коэффициент вязкости невозмущенного потока, m^2/c [4, с. 15]:

$$\vartheta = \mu / \gamma, \tag{9}$$

μ – динамический коэффициент вязкости $кг/(м \cdot с)$:

$$\mu = \mu_{ном} \left(\frac{T_{cpc}}{T_{ном}} \right)^n, \tag{10}$$

n – показатель степени (при малых температурах равен 0,5, а при больших приближается к 1).

Из формулы (4) следует, что с увеличением аэродинамической силы (скорости распыляющего потока), действующей на плавящиеся в дуге электроды, уменьшается размер частицы.

Поскольку принимается, что частица расплавленного металла имеет форму шара, то значение коэффициента ее лобового сопротивления C_x в зависимости от числа Re можно определить по графику [4, с. 142, рис. 94]. При $Re > 500$ $C_x = 0,44$.

$$F_C = s (V_{cpc} - V_{ctx})^2 C_x \gamma, \tag{11}$$

V_{cpc} – средняя скорость струи в пределах малого участка пути:

$$V_{cpc} = (V_{cn} + V_{cx}) / 2, \tag{12}$$

где V_{cn} – скорость струи в начале данного малого участка; V_{cx} – скорость струи в конце данного малого участка.

$$F_J = -m \frac{\Delta V_x}{\Delta t}, \tag{13}$$

Δt – время полета частицы в пределах малого участка, с; ΔV_x – изменение скорости частицы за время Δt :

$$\Delta V_x = V_{кx} - V_{nx}, \tag{14}$$

$$\Delta L = V_{ctx} \Delta t. \tag{15}$$

Подставляя формулы (12)...(15) в (11), получаем квадратное уравнение, корнем которого и будет скорость частицы в конце малого участка пути:

$$V_{кx} = \frac{V_{cpc} - \sqrt{V_{cpc}^2 + 4 \frac{m}{C_x s \gamma \Delta L} \left(V_{cpc}^2 - V_{cpc} V_{nx} + \frac{m V_{nx}^2}{C_x s \Delta L} \right)}}{2m / C_x s \gamma \Delta L}. \tag{16}$$

Зависимость скорости струи и частиц на оси от дистанции напыления при различном коэффициенте избытка воздуха α в горючей смеси показана на рисунке 1.

Видно, что чем больше скорость струи, тем больше скорость частицы, и у частиц после завершения начального участка газовой струи скорость изменяется с малой интенсивностью, что связано с относительно большой массой частиц.

Температура струи на поверхности частицы, летящей в неподвижной среде, определяется по формуле [4, с. 112, (5.18)]:

$$T_{срч} = T_{срв} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right), \tag{17}$$

где M – число Маха:

$$M = \frac{V}{a_0}, \tag{18}$$

где V – относительная скорость частицы; a_0 – скорость звука в атмосфере [4, с. 25, (2.25)]:

$$a_0 = \sqrt{k_g g R_g T_{II}}, \quad (19)$$

где R_g – газовая постоянная воздуха, $R_g = 29,27$ кг·м/кг·град [5, с. 29].

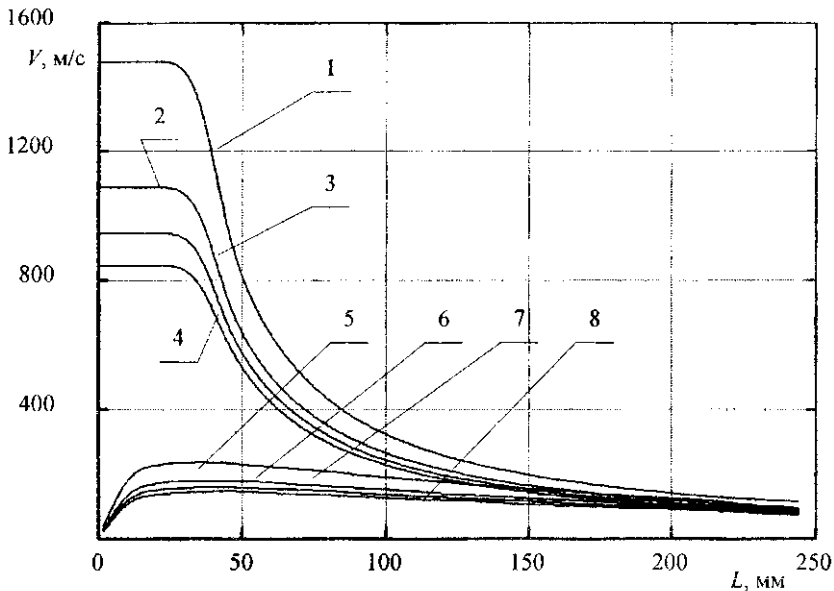


Рис. 1. Зависимость скорости струи (1 – 4) и частиц (5 – 8) при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1,0$ (1, 5); $\alpha = 1,3$ (2, 6); $\alpha = 1,5$ (3, 7); $\alpha = 1,7$ (4, 8) от дистанции напыления

Так как частица движется, во-первых, относительно неподвижной среды помещения, а во-вторых, относительно струи, то в (17) необходимо ввести слагаемое, учитывающее движение частицы относительно струи:

$$T_{срч} = T_{ср} \left(1 + \frac{k-1}{2} \left(\frac{V_{срч}}{a_0} \right)^2 + \frac{k-1}{2} \left(\frac{V_{срч} - V_{ср}}{a_{nc}} \right)^2 \right), \quad (20)$$

где a_{nc} – скорость звука в струе:

$$a_{nc} = \sqrt{k_{nc} g R T_{ср}}. \quad (21)$$

В формуле (20) второе слагаемое выражает сопротивление воздуха помещения полету частицы, а третье слагаемое – сопротивление частицы струе продуктов горения пропано-воздушной смеси.

Начальная температура частицы в момент ее отрыва от электрода равна температуре плавления:

$$T_{nx} = T_{пл}, \quad (22)$$

где $T_{пл}$ – температура плавления материала проволоки, для стали $T_{пл} = 1801$ °К [2, с. 56, табл. 5.1].

Для оценки температуры частицы по глубине расчет производился по формуле [6, с. 67, (4.25)]:

$$T_{nx} = (T_{nx} - T_{срч}) \frac{R_x}{R \sqrt{3Bi}} \sin \left(\sqrt{3Bi} \frac{R}{R_x} \right) \exp \left(-3Bi \frac{3600 \alpha_{mo} \Delta L}{V_{срч} R_x^2} \right) + T_{срч}, \quad (23)$$

где Bi – число Био:

$$Bi = \frac{\alpha_{mo} R_x}{\lambda}, \quad (24)$$

α_{mo} – коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{mo} = \omega \alpha_k + \alpha_r, \quad (25)$$

где ω – коэффициент омывания, $\omega = 1$; α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, ккал/ м²·ч·град; α_r – коэффициент теплоотдачи излучением, ккал/ м²·ч·град; λ – коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·град) [2, с. 264, табл. 15.6];

$$a_{mo} = \frac{\lambda}{c_{px}\gamma_{np}}, \quad (26)$$

где c_{px} – теплоемкость материала частицы, для стали $c_{px} = 0,1590$ ккал/(кг·град) [3, с. 162, табл. 10.7].

γ_{np} – плотность материала частицы, кг/м³ [3, с. 56, табл. 5.1].

Расчет по формуле (26) показал, что температура частицы с радиусом $R_x = 15 \cdot 10^{-6}$ м равна температуре окружающей ее среды. Поэтому для расчетов изменения температуры частицы была взята формула плотности теплового потока [7, с. 51, (11.6)]:

$$W = 0,172\alpha c\gamma_c V_{cpc} (T_{cpc} + T_{срчб} - T_{ок}), \quad (27)$$

где γ_c – средневзвешенная плотность продуктов горения:

$$\gamma_c = X_{CO_2} \gamma_{CO_2} + X_{H_2O} \gamma_{H_2O} + X_{N_2} \gamma_{N_2} + X_{возд} \gamma_{возд}, \quad (28)$$

где γ_{CO_2} – плотность оксида углерода, $\gamma_{CO_2} = 1,9768$ кг/м³; γ_{H_2O} – плотность паров воды, $\gamma_{H_2O} = 0,5980$ кг/м³;

γ_{N_2} – плотность азота, $\gamma_{N_2} = 1,2505$ кг/м³; $\gamma_{возд}$ – плотность воздуха, $\gamma_{возд} = 1,2928$ кг/м³ [2, с. 57, табл. 5.2].

Изменение температуры частицы за время полета в пределах малого участка пути:

$$\Delta T = Ws \frac{\Delta L}{V_{cpx} c_{px} m}, \quad (29)$$

где s – площадь частицы:

$$s = 4\pi R_x^2, \quad (30)$$

c_{px} – теплоемкость материала частицы, для стали $c_{px} = 0,1590$ ккал/(кг·град) [2, с. 162, табл. 10.7].

Температура частицы в конце малого участка всего пути полета ΔL :

$$T_x = T_{ок} + \Delta T. \quad (31)$$

Зависимость температуры частиц и струи от дистанции напыления при различных коэффициентах избытка воздуха α в горючей смеси показана на рис. 2.

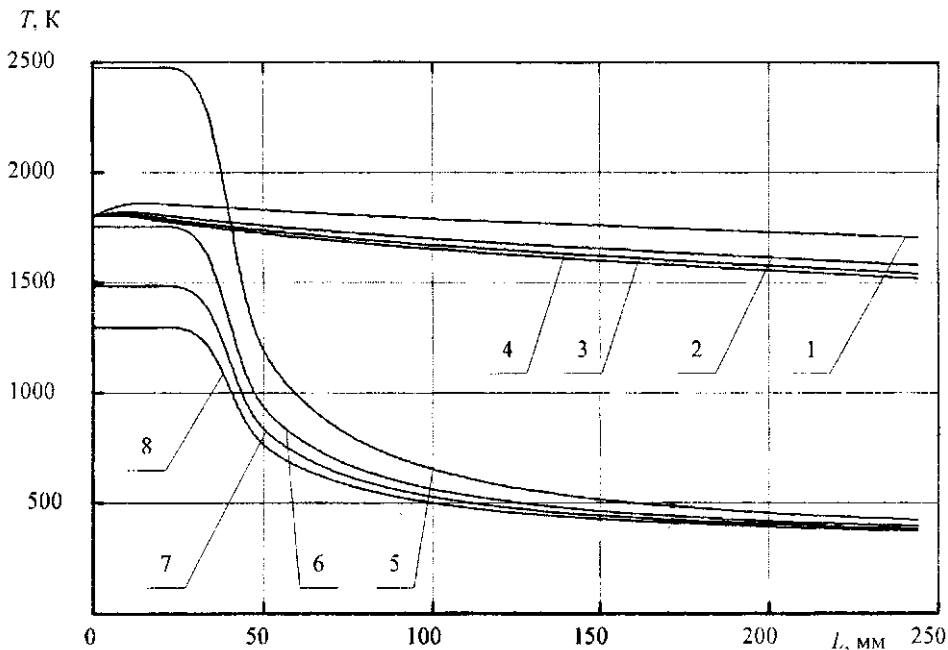


Рис. 2. Зависимость температуры частиц (1 – 4) и струи (5 – 8) при коэффициентах избытка воздуха $\alpha = 1$ (1, 5), $\alpha = 1,3$ (2, 6), $\alpha = 1,5$ (3, 7), $\alpha = 1,7$ (4, 8) от дистанции напыления

Как видно из рисунка 2, температура частиц при $a = 1,0$ (кривая I) на начальном участке струи несколько повышается и далее падает менее интенсивно, чем при других коэффициентах избытка воздуха, больших 1,0.

Очевидно, что у частиц после окончания начального участка газовой струи температура изменяется с малой интенсивностью, связано это с энтальпией плавления металла.

Таким образом, оптимальным режимом напыления активированной дуговой металлизации является обеспечение коэффициента избытка воздуха $a = 1,0.. 1,1$ и дистанции напыления 190...210 мм.

Заключение

Теоретически установлено, что при активированной дуговой металлизации частицы распыляемого материала на расстоянии до 200 мм от среза сопла металлизатора находятся в расплавленном состоянии, обеспечивая образование плотного покрытия с высокой когезией к основе.

В результате исследований получены зависимости, позволяющие управлять качеством покрытия при значительном сокращении количества экспериментальных данных. Определены параметры оптимального режима напыления: коэффициент избытка воздуха 1,0.. 1,1 и дистанция напыления 190...210 мм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований по гранту T05K-042 «Сквозное проектирование ресурсосберегающих технологий и средств оснащения электрофизических и термомеханических процессов упрочнения поверхностей изделий».

ЛИТЕРАТУРА

1. Петруничев В.А., Кудинов В.В., Кулагин И.Д. Получение сфероидизированного металлического порошка распылением проволоки // Известия АН СССР. Сер. Металлы. 1965. - № 2. С. 88 - 95.
2. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. - М.: Атом издат, 1976. 1004 с.
3. Свойства элементов: Справ. изд. / Под ред. М.Е. Дрица. - М.: Металлургии, 1985. - 672 с.
4. Мельников А.П. Аэродинамика больших скоростей. - М.: Воениздат, 1961. - 424 с.
5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. - М.: Физматгиз, 1959. - 356 с.
6. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. - М.: Госэнергоиздат, 1958. - 416 с.
7. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. - М.: Госэнергоиздат, 1948. - 288 с.