

УДК 621.791

Н.Н. Струков, Д.С. Белинин, П.С. Кучев, Ю.Д. Щицын

N.N. Strukov, D.S. Belinin, P.S. Kuchev, Y.D. Schitsyn

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
State National Research Polytechnic University of Perm

РЕГУЛИРОВАНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ ПОРОШКОВ ПРИ ПЛАЗМЕННОМ РАСПЫЛЕНИИ ПРУТКОВОГО МАТЕРИАЛА

REGULATION OF THE SIZE OF POWDER PARTICLES IN PLASMA SPUTTERING WIRE

Представлено математическое описание размера частиц, формирующихся при распылении пруткового материала плазменной струей. Установлено что основными факторами дисперсности частиц являются: диаметр проволоки, давление плазмообразующего и распыляющего газов и температура перегрева металла.

Ключевые слова: распыление, металлический порошок, плазма, математическая модель.

The paper presents a mathematical description of the size of particles formed during bar material spray with plasma arc. It is established that the main factors of dispersion of the particles are: wire diameter, plasma and spray gas pressure, metal heat temperature.

Keywords: sputtering, metal powder, plasma arc, a mathematical model.

Металлические порошки заданного гранулометрического состава находят широкое применение в промышленности [1]. Технологические особенности получения порошка определенной грануляции при плазменном распылении обусловлены, прежде всего, спецификой нагрева, плавления и переноса присадочного материала – проволоки, прутков.

Исследованию нагрева, плавления присадочного материала и его отрыва в дугах аргона и углекислого газа при сварке, в процессах плазменной металлизации посвящено значительное число теоретических и экспериментальных работ [2–4]. Однако применительно к условиям плазменного распыления эти процессы малоизучены.

Экспериментальное определение процессов нагрева металла, отрыва расплавленной капли и температуры оторвавшихся частиц в плазменной струе весьма сложно. В связи с этим для их исследования целесообразно использовать методы математического моделирования.

Процесс плавления и распыления проволоки (образования дисперсных частиц) плазменной струей или сжатой дугой может осуществляться на оборудовании, применяемом для плазменной металлзации. Наиболее простым способом является распыление нейтральной проволоки, которая вводится в плазменную струю (рис. 1, а). Этот способ имеет малую производительность, но в то же время его можно применить к неэлектропроводным материалам.

При распылении токоведущей проволоки анодное пятно находится на торце распыляемой проволоки, производительность процесса возрастает в 5–7 раз по сравнению с распылением нейтральной проволоки (рис. 1, б, в).

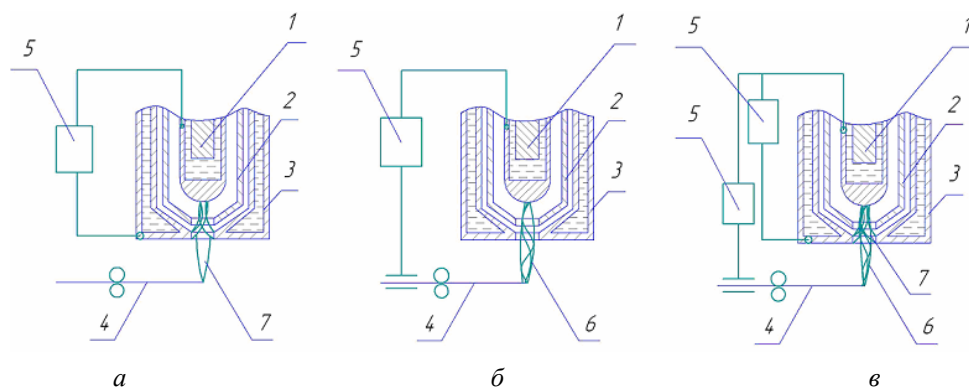


Рис. 1. Схемы плазменного распыления: а – распыление плазменной струей; б – распыление сжатой дугой; в – комбинированное распыление сжатой дугой совместно с плазменной струей; 1 – электрод; 2 – плазмообразующее сопло; 3 – распыляющее сопло; 4 – распыляемая проволока; 5 – источник питания горелки; б – сжатая дуга; 7 – плазменная струя

Нагрев проволоки и ее плавление происходит за счет теплоты дуги и джоулева тепла, выделяемого в вылете проволоки. Процесс существования капли на торце проволоки характеризуется более коротким периодом по сравнению с плавлением сварочного электрода или проволоки в защитных газах. Это объясняется значительными силами, действующими на каплю со стороны нагретого до высокой температуры газового потока. Капли жидкого металла срываются с торца проволоки, теплоотдача от дуги к проволоке улучшается, объем капель уменьшается, а их количество возрастает.

Отрыв капли с торца проволоки осуществляется в результате действия различных сил – это давление дуги, реактивные силы при испарении металла и выделении газов, гравитационные силы, силы поверхностного натяжения, электродинамические силы и др.

В момент отрыва капля имеет произвольную форму, после отрыва под действием сил поверхностного натяжения происходит сфероидизация и кри-

сталлизация капли. Размеры закристаллизовавшихся капель и показывают дисперсность порошка.

Процесс распыления проволоки струей плазмы можно представить следующим образом. Плазменная струя нагревает и плавит торец проволоки, в результате чего на торце образуется жидкая капля металла. На образующуюся каплю действуют силы со стороны плазменной струи, гравитационные силы самой капли – эти силы стремятся оторвать каплю. Основной удерживающей силой является поверхностное натяжение между каплей и торцом проволоки. В момент, когда силы, стремящиеся оторвать каплю, превышают удерживающие, капля отрывается от проволоки и уносится потоками газа (рис. 2).

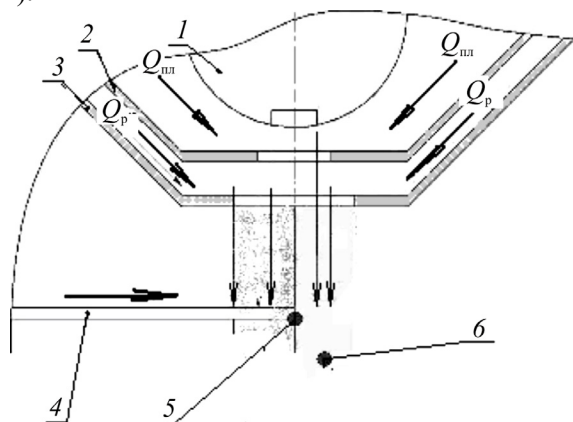


Рис. 2. Процесс распыления плазменной струей: 1 – электрод; 2 – плазмообразующее сопло; 3 – защитное сопло; 4 – распыляемая проволока; 5 – жидкая капля; 6 – оторвавшаяся частица; $Q_{пл}$ – подача плазмообразующего газа; $Q_{р}$ – подача распыляющего газа

Условие, когда капля еще остается на конце проволоки перед ее отрывом, определяется равенством срывающих и удерживающих ее сил:

$$0 = \sum_i F_i = F_{г} + F_{пн} + F_{эд} + F_{рд} + F_{дп} + F_{др}, \quad (1)$$

где $F_{г}$ – сила тяжести, Н; $F_{пн}$ – сила поверхностного натяжения, Н; $F_{эд}$ – электродинамическая сила, Н; $F_{рд}$ – сила реактивного давления испаряющегося металла и выделения газа, Н; $F_{дп}$ – сила давления потоков плазмы, Н; $F_{др}$ – сила давления распыляющих газов, Н.

Наибольшее влияние на перенос капель металла в плазменном потоке оказывают следующие силы: сила тяжести, сила поверхностного натяжения, сила давления потоков плазмы, сила давления распыляющих газов.

Таким образом, уравнение отрыва капли от проволоки (1) примет вид:

$$0 = \sum_i F_i = F_T - F_{\text{пн}} + F_{\text{дп}} + F_{\text{др}}, \quad (2)$$

$$F_T = m_c g.$$

Сила поверхностного натяжения может быть записана как

$$F_{\text{пн}} = \pi \sigma d_{\text{пр}},$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения материала электрода при заданной температуре в месте приложения силы, Дж/м²; $d_{\text{пр}}$ – диаметр проволоки, м.

Сила давления потоков плазмы может быть записана следующим образом:

$$F_{\text{дп}} = M_{\text{пл}} v_{\text{пл}},$$

где $M_{\text{пл}}$ – масса потока плазмы, проходящая через заданное сечение за единицу времени, кг/с; $v_{\text{пл}}$ – скорость потока плазмы в заданном сечении, м/с.

Сила давления распыляющих газов может быть записана как

$$F_{\text{др}} = M_p v_p,$$

где M_p – масса потока распыляющего газа, проходящая через заданное сечение в единицу времени, кг/с; v_p – скорость потока распыляющего газа в заданном сечении, м/с.

Для простоты расчета каплю на конце проволоки будем считать сферической, а гравитационные силы не учитывать совсем, так как сравнение показывает, что вес частицы на несколько порядков меньше сил, действующих на нее со стороны струи. Тогда уравнение (2) можно переписать в виде

$$\pi \cdot \sigma \cdot d_{\text{пр}} = M_{\text{пл}} v_{\text{пл}} = M_p v_p. \quad (3)$$

В формуле (3) не учитывается действие потоков плазмы и газа на каплю. Для учета действия давлений потоков введем коэффициент отношения сечения капли к сечению потока газов. Тогда уравнение (2) примет вид

$$\pi \cdot \sigma \cdot d_{\text{пр}} = \frac{d_k}{d_p} (M_{\text{пл}} v_{\text{пл}} + M_p v_p),$$

где d_k – диаметр капли, м; d_p – диаметр распыляющего сопла, м.

Откуда диаметр капли (частицы)

$$d_k = \frac{\pi \cdot \sigma \cdot d_{\text{пр}} \cdot d_p}{M_{\text{пл}} v_{\text{пл}} + M_p v_p}.$$

Так, для случая распыления токоведущей проволоки диаметром $1,0 \cdot 10^{-3}$ м, диаметром плазмообразующего сопла $3,0 \cdot 10^{-3}$ м, диаметром распыляющего сопла $5,0 \cdot 10^{-3}$ м, расходе плазмообразующего газа (аргон) 2 л/мин, расходе распыляющего газа (аргон) 5 л/мин, напряжением 27 В и силой тока 200 А размер частиц преимущественной фракции составляет 300 мкм. Расхождение расчетного и экспериментального метода объясняется не только допущениями, сделанными при выводе формулы, но также невозможностью точного учета пространственного положения капель на торце проволоки и ряда других факторов.

Сделаем следующие выводы:

1. Разработан алгоритм, позволяющий производить оценку размера частиц металлических порошков исходя из знания технологических параметров процесса.

2. Размер частиц порошков возможно регулировать изменением диаметра проволоки, массовым и скоростным расходом газов, а также температурой перегрева жидкой капли, уменьшающей удерживающие силы. Увеличение тока дуги и массовых расходов газа с уменьшением диаметра распыляемого материала приводит к получению сферических порошков с более мелкими частицами.

Список литературы

1. Пути развития в России производства железных и легированных порошков / В.Б. Акименко [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. – 2006. – № 4. – С. 8–11.

2. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1979. – 221 с.

3. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.

4. Крампит Н.Ю. Способы управления плавлением и переносом электродного металла // Сварочное производство. – 2009. – № 3. – С. 31–36.

Получено 13.09.2011