

Н.Н. Струков, Ю.Д. Щицын

N.N. Strukov, Y.D. Schitsyn

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

**ОХЛАЖДЕНИЕ И ТОРМОЖЕНИЕ РАСПЛАВЛЕННЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В ГАЗОВОМ ПРОТИВОПОТОКЕ
ПРИ ПЛАЗМЕННОМ РАСПЫЛЕНИИ**

**COOL AND BRAKING MOLTEN METALLIC PARTICLES
IN A GAS COUNTER IN PLASMA SPUTTERING**

Представлено описание процессов охлаждения и торможения расплавленных металлических частиц, формирующихся при распылении пруткового материала плазменной струей. Установлено, что одним из эффективных способов управления процессами охлаждения и торможения частиц является противопоток газовой среды.

Ключевые слова: охлаждение, торможение, металлический порошок, плазма, математическая модель.

The paper describes the processes of cooling and braking of molten metal particles formed during spray bar material of the plasma arc. It was established that one of the most effective ways to manage the processes of cooling and braking of the particles is countercurrent gas.

Key words: cooling, braking, metal powder, plasma, a mathematical model.

Постоянное увеличение и изменение номенклатуры применения металлических порошков сопровождается изменением требований к свойствам порошков. Получение чистых металлических порошков заданной формы и размера связано с некоторыми проблемами: невозможностью получения чистых металлических порошков без применения качественного сырья и дополнительных процессов химико-термической обработки; невозможностью получения порошков разнообразной номенклатуры с заданными свойствами и малыми партиями; большой стоимостью порошков; жесткой специализацией оборудования под определенную номенклатуру порошков и в большинстве случаев – большими размерами оборудования для получения порошков. Устранение части недостатков возможно при плазменном распылении пруткового материала для получения порошков.

Преимущества предлагаемого метода: возможность получения порошков различной номенклатуры; регулирование химического состава порошков в процессе распыления; мобильность оборудования плазменного распыления. В процессе получения чистых металлических порошков плазменным распылением существует вероятность спекания частиц в сборнике. Такой факт можно объяснить тем, что частицы, имея высокую скорость и не успев закристаллизоваться, достигают сборника. Такие частицы объединяются в конгломераты, образуя брак. Традиционно спекание в сборнике устраняется увеличением длины пролета частиц, что увеличивает габариты оборудования. Для уменьшения длины пролета частиц предлагается использовать встречный поток газа. Регулирование процессов движения теплообмена частиц предотвращает создание конгломератов спекшихся частиц и позволяет контролировать свойства получаемых частиц порошков. Поэтому целесообразно изучение влияния противотока газа на торможение расплавленных частиц и изменение интенсивности охлаждения частиц [1].

Целью работы является оценка влияния противотока газовой среды на охлаждение и торможение металлических частиц в условиях получения порошков плазменным распылением пруткового материала. Исследованию двухфазных потоков посвящено значительное число теоретических и экспериментальных работ [2]. Однако применительно к условиям плазменного распыления эти процессы малоизучены.

Экспериментальное определение процессов торможения и охлаждения нагретых частиц в потоке газа весьма сложно. В связи с этим для их исследования целесообразно использовать методы математического моделирования.

Движение частиц в потоке газа характеризуется скоростью движения частиц и среды, а также зависит от свойств материала частиц и среды. В данном случае поток среды постоянен, не имеет скорости или направлен навстречу движению частиц. Движение частицы в потоке газа подчиняется закону Ньютона. В общем случае движение частицы может быть записано в следующем виде [3]:

$$m_{\text{ч}} \frac{dv_{\text{ч}}}{dt} = \sum_i F_i = F_{\text{с}} + F_{\text{д}} + F_{\text{Б}} + F_{\text{вр}} + F_{\text{тф}} + F_{\text{вн}},$$

где $m_{\text{ч}}$ – масса частицы, кг; $v_{\text{ч}}$ – скорость частицы, м/с; t – время, с; $F_{\text{с}}$ – сила сопротивления среды, Н; $F_{\text{д}}$ – сила в граничном слое частицы из-за действия градиента давлений, Н; $F_{\text{Б}}$ – сила Бассета, Н; $F_{\text{вр}}$ – сила, возникающая вследствие вращения частицы, Н; $F_{\text{тф}}$ – сила термофореза, Н; $F_{\text{вн}}$ – внешние силы, Н.

Наибольшее влияние на движение частицы оказывает сила газодинамического напора газа, сила тяжести также вносит существенные поправки в расчеты. Остальными силами можно пренебречь. Следовательно, уравнение движения частиц запишется в виде

$$m_{\text{ч}} \frac{dv_{\text{ч}}}{dt} = \sum_i F_i = F_{\text{с}} + F_{\text{т}}. \quad (2)$$

Сила газодинамического напора

$$F_{\text{с}} = \frac{1}{2} C_f \rho_{\text{ср}} (v_{\text{ср}} - v_{\text{ч}}) |v_{\text{ср}} - v_{\text{ч}}| S_{\text{М}},$$

где C_f – коэффициент сопротивления среды; $\rho_{\text{ср}}$ – плотность потока среды, кг/м³; $v_{\text{ср}}$ – скорость потока среды, м/с; $S_{\text{М}}$ – миделево сечение частицы, $S_{\text{М}} = \pi d_{\text{ч}}^2/4$, м², $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы, м.

Решение задачи движения частицы в потоке газа сводится к нахождению коэффициента сопротивления. Принято характеризовать коэффициент сопротивления как функцию от числа Рейнольдса $C_f = f(\text{Re})$:

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{ср}} \cdot d_{\text{ч}} (v_{\text{ср}} - v_{\text{ч}})}{\mu_{\text{ср}}},$$

где $\mu_{\text{ср}}$ – вязкость среды, кг/(м·с).

Для дальнейших расчетов принята зависимость $C_f = f(\text{Re})$ в виде [4]:

$$C_f = \begin{cases} 1000 & 0 \leq \text{Re} < 0,001; \\ 24 \cdot \text{Re}^{-1} + 2,448 \cdot \text{Re}^{-0,05} & 0,001 \leq \text{Re} < 2; \\ 24 \cdot \text{Re}^{-1} + 2,76 \cdot \text{Re}^{-0,2} & 2 \leq \text{Re} < 21; \\ 24 \cdot \text{Re}^{-1} + 4,536 \cdot \text{Re}^{-0,368} & 21 \leq \text{Re} < 200; \\ 0,44 & 200 \leq \text{Re}. \end{cases}$$

Теплообмен частиц со средой в потоке газа характеризуется охлаждением частицы и описывается формулой классической термодинамики

$$m_{\text{ч}} c_{\text{ч}} \frac{dT_{\text{ч}}}{dt} = \sum_i P_i,$$

где $c_{\text{ч}}$ – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); $T_{\text{ч}}$ – температура частицы, К; $\sum_i P_i$ – суммарная мощность, передаваемая в частицу, представляющая собой сумму мощностей всех рассматриваемых для данной стадии нагрева частицы механизмов передачи.

Процесс охлаждения частиц связан с тем, что на этой стадии мощность, вводимая в частицу, равна нулю, а расходуемая мощность частицы идет на нагрев среды. Процессы теплопередачи описываются сложными дифференциальными уравнениями, в большинстве случаев не имеющими аналитиче-

ского решения. Для решения таких задач используют метод моделирования. За основу принимается ньютоновская модель теплопередачи: количество теплоты, переносимое в единицу времени к единице площади поверхности тела, находится из

$$q = \alpha \Delta T.$$

где α – коэффициент теплопередачи; ΔT – температурный напор в пограничном слое.

Решение задачи теплообмена частицы в потоке газа сводится к нахождению коэффициента теплопередачи, который зависит от свойств частицы и потока среды. Принято характеризовать коэффициент теплопередачи как функцию от числа Рейнольдса и Прандтля:

$$\text{Nu} = \alpha \frac{d_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{пл}}} = f(\text{Re}, \text{Pr}).$$

Для дальнейших расчетов зависимости числа Нуссельта от чисел Рейнольдса и Прандтля примем в виде [5]

$$\text{Nu} = \begin{cases} 2 + 0,6 \cdot \text{Re}^{0,5} \cdot \text{Pr}^{0,333} & 0 \leq \text{Re} < 2; \\ 2 + 0,459 \cdot \text{Re}^{0,55} \cdot \text{Pr}^{0,333} & 2 \leq \text{Re} < 2 \cdot 10^5. \end{cases}$$

Частные решения для нахождения скорости, температуры и координаты частицы, движущейся в потоке среды, можно представить в виде [6]:

$$v_{\text{ч}} = \left(v_{\text{ср}} - \frac{g}{n} \right) (1 - e^{-nt}) + v_{\text{ч0}} e^{-nt}, \text{ где } n = \frac{3A\mu_{\text{ср}}}{4\rho_{\text{ч}}d_{\text{ч}}^2}, \quad A = C_f \text{ Re},$$

$$T_{\text{ч}} = T_{\text{ср}} (1 - e^{-Kt}) + T_{\text{ч0}} e^{-Kt}, \text{ где } K = \frac{6\lambda_{\text{ср}} \text{Nu}}{c\rho_{\text{ч}}d_{\text{ч}}},$$

$$x = \frac{1}{n} \left(v_{\text{ср}} - \frac{g}{n} \right) (nt - 1 + e^{-nt}) + \frac{v_{\text{ч0}}}{n} (1 - e^{-nt}),$$

где $\rho_{\text{ср}}$ – плотность газового потока, кг/м³; C_f – коэффициент аэродинамического сопротивления; $v_{\text{ч0}}$ – начальная скорость частицы, м/с; $T_{\text{ср}}$ – температура потока среды, К; $T_{\text{ч0}}$ – начальная температура частицы, К; $\lambda_{\text{ср}}$ – теплопроводность газового потока, Вт/(м·К).

Расчетное сравнение ускорения и скорости теплообмена частиц в среде и с созданием противопотока представлено на рисунке. Входные регулируемые параметры плазменной горелки, используемые для расчета, представлены в таблице. Скорости противопотока среды отмечены на кривых. В качестве

расчетного материала использовалась проволока диаметром 1,2 мм, материал проволоки 10X18Н9Т. При воздействии противотока скорость частиц уменьшается и растет скорость охлаждения. Частицы меньших размеров имеют большую интенсивность изменения скорости и температуры в среде. С возрастанием размеров частиц для их торможения требуется создание больших скоростей противотока, чем для меньших частиц.

В случае уравнивания сил, действующих на частицы, возможна остановка и изменение скорости частиц в противоположном направлении. Как следствие, становится возможной обработка частиц в подвешенном состоянии и проведение отсева частиц по фракциям. Получение чистых порошков производится в контролируемой атмосфере, с чем связано более активное взаимодействие частиц, в данном случае требуется меньше энергии для спекания, соединения частиц. Отрицательным фактором обработки частиц в подвешенном состоянии является возможность соединения расплавленных частиц между собой. Подбор оптимальных скоростей противотока устраняет этот недостаток.

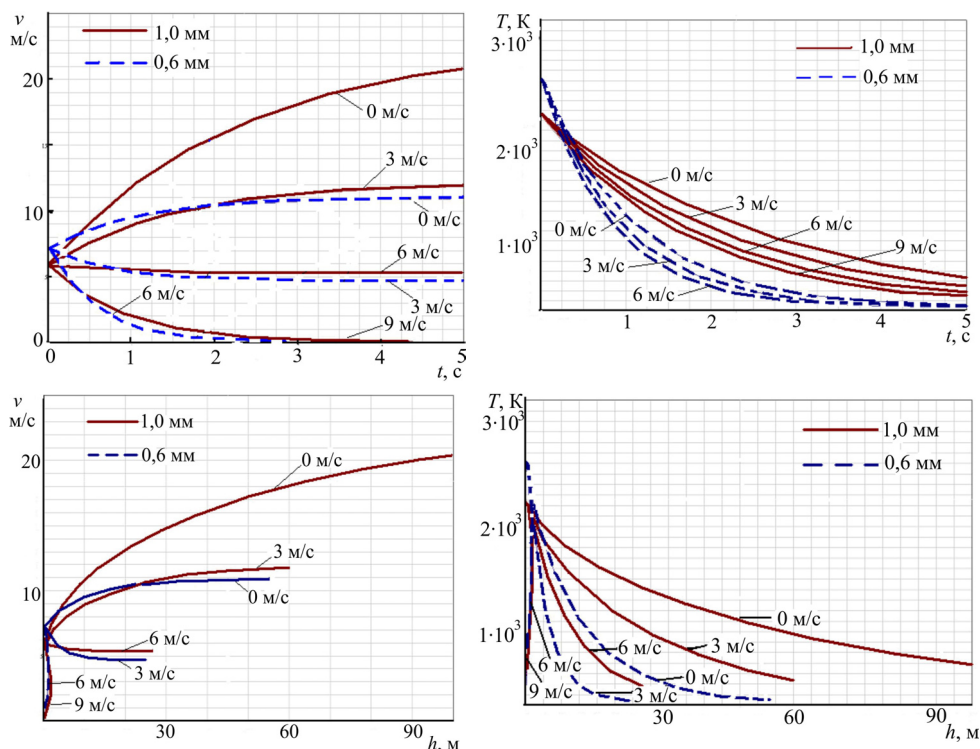


Рис. Зависимости скорости и температуры частиц от времени и длины пролета при свободном движении в среде и противотоке (v – осевая скорость частиц, T – температура частиц, h – длина пролета частиц)

Параметры режимов расчета процесса распыления

Диаметр частиц $d_{ч}$, мм	Мощность дуги $N_{д}$, кВт	Расход плазмобразующего газа $Q_{плз}$, л/мин	Расход стабилизирующего газа $Q_{стз}$, л/мин
1,0	5,0	3	5,0
0,6	7,0	3,8	5,0

Сделаем следующие выводы:

1. Разработан алгоритм, позволяющий производить оценку интенсивности изменения скорости и температуры частиц металлических порошков в потоке среды в зависимости от технологических параметров процесса.

2. Установлены оптимальные значения структуры противопотока газовой среды в зависимости от размера частиц и свойств материала.

Список литературы

1. Горбис Э.Р. Теплообмен и гидродинамика дисперсных сквозных потоков. – М.: Энергия, 1970. – 424 с.

2. Selberg В.Р., Nicholls J.A. Коэффициент лобового сопротивления сферических частиц небольшого размера // Ракетная техника и космонавтика. – 1968. – № 3, 22. – С. 22–31.

3. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергоиздат, 1981. – 472 с.

4. Поляков С.П., Рязанцев О.В., Твердохлебов В.И. О нагреве и движении частиц порошка в плазменных струях // Физика и химия обработки материалов. – 1975. – № 3. – С. 43–47.

5. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко [и др.]. – М.: Наука, 1990. – 408 с.

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

Получено 2.02.2012