

УДК: 533.9

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ С УСКОРЕНИЕМ ПОТОКА
ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА ПЛАЗМОТРОНА

С. А. Мальцев

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»

Email: malkoff77793@yandex.ru

Введение:

Для формирования качественных покрытий с высокой прочностью сцепления напыленного материала с основой необходимо чтобы напыляемые частицы двигались с высокой скоростью и были хорошо нагреты, но при этом скорость не должна превысить критических значений, а частицы не должны быть перегреты.

Актуальность:

Детали агрегатов и систем автотранспортных средств достаточно дороги. Восстановление автомобильных деталей, является сложной проблемой, поскольку к качеству их рабочих поверхностей и геометрическим характеристикам предъявляются достаточно жесткие требования.

Плазменное напыление – наиболее прогрессивный способ восстановления деталей, работающих в условиях знакопеременных, циклических и ударных нагрузок.

Цель работы: Построить математическую модель для определения оптимальных параметров технологического процесса плазменного напыления, которая позволит теоретически определить скорость потока расплавленных напыляемых частиц при соблюдении важного условия – нагрев напыляемого материала до температуры плавления с минимальным перегревом материала.

Разработка математической модели:

Схема взаимосвязи входных параметров (факторов) и выходных показателей математической модели (критериев) показана на рисунке 1.

На схеме применены следующие обозначения: d_{cp} – средний диаметр частиц порошка; $\rho_{п}$ – плотность материала порошка; μ – динамическая вязкость газовой фазы; γ – показатель политропы газовой фазы; ΔN – амплитуда импульсов мощности; τ – длительность импульсов мощности; ν – частота модуляции; $c_{от}$ – скорость звука в потоке на срезе сопла плазмотрона; Re – число Рейнольдса.

дса течения газовой фазы относительно движущихся частиц (для конкретного случая движения частицы в потоке плазмы) – показатель предельных значений перехода от ламинарного течения к турбулентному для потока плазмы с движущимися в нем частицами напыляемого материала; ΣF – равнодействующая сил, действующих на частицу, движущуюся в потоке плазмы; C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления частиц; $V_{\text{ч}}$ – скорость движения частиц напыляемого материала; T° – температура частиц напыляемого материала.

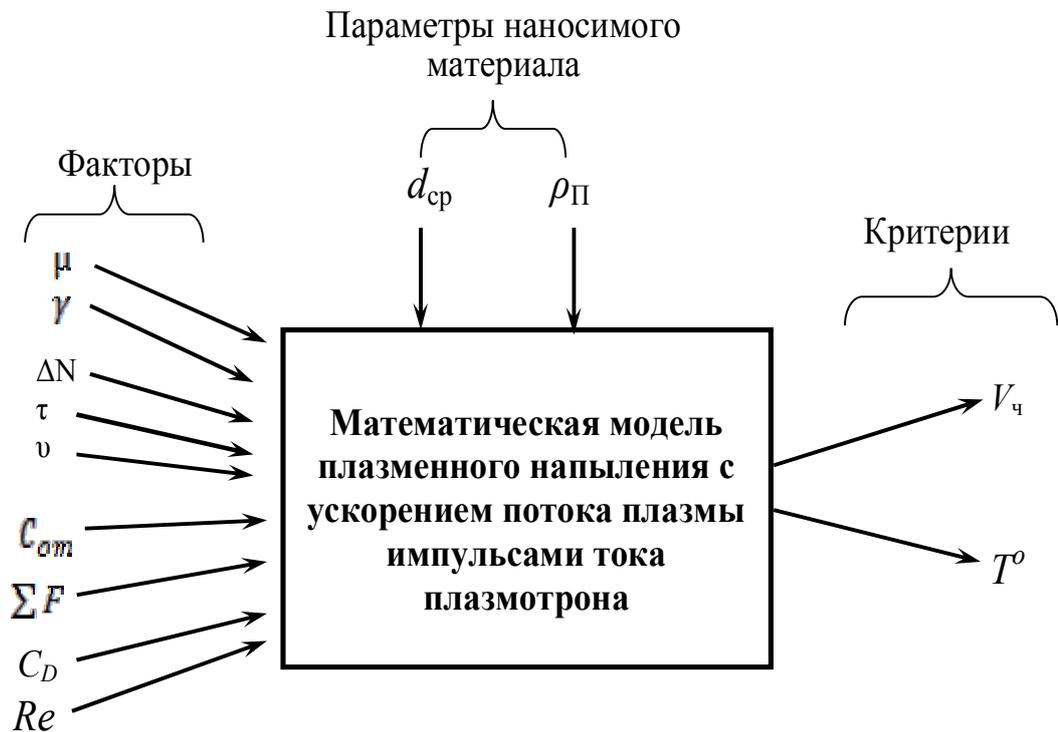


Рисунок 1 – Входные и выходные параметры математической модели

Если выразить массу частицы через её плотность и объём, а ускорение как первую производную скорости частицы по времени, то, согласно второму закону Ньютона уравнение движения частицы порошка можно записать следующим образом:

$$\rho_{\text{ч}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ч}}^3}{6} \cdot \frac{dV_{\text{ч}}}{dt} = \Sigma F, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ и $d_{\text{ч}}$ – плотность и диаметр частицы соответственно.

Проанализируем показатель ΣF (сумма сил, действующих на частицу, движущуюся в струе плазмы). В потоке плазмы на частицу действуют в основном три силы – это сила аэродинамического сопротивления, сила Магнуса и

сила термофореза [2]. Действие других сил пренебрежимо мало. В работе [1] указывается, что термофорез может сказаться для частиц с диаметром менее 5 мкм, размер наших частиц как минимум на порядок выше. Эффект Магнуса, заключающийся в миграции частицы в область с большей скоростью, важен в области ввода частиц в плазменный поток на начальном участке у среза сопла плазмотрона и для условий плазменного напыления им можно пренебречь [2].

Следовательно, будем учитывать только силу аэродинамического сопротивления:

$$F = C_D \cdot \frac{\rho_p \cdot (v_p - v_c)^2}{2} \cdot A_c, \quad (2)$$

где C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ_p – плотность плазмы; v_p, v_c – скорость плазмы и частицы соответственно; A_c – миделево сечение частицы, примем

$$A_c = \pi \cdot d_c^2 / 4. \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1) получим

$$\rho_c \cdot \frac{dv_c}{dt} = C_D \cdot \frac{3 \cdot \rho_p \cdot (v_p - v_c)^2}{4 \cdot d_c}. \quad (4)$$

Рассмотрим поток со средней скоростью v_p ср, в котором имеются периодические распространяющиеся вдоль оси потока бегущие волны скорости с амплитудой v_a и частотой f_M .

Коэффициент аэродинамического сопротивления частиц определяется исходя из критерия перехода течения потока плазмы от ламинарного истечения к турбулентному. Этим критерием является число Рейнольдса (Re).

Для диапазона ($Re = 1-500$) коэффициент аэродинамического сопротивления частиц с учетом влияния инерционности потока среды определим по формуле [2] (зависимость Клячко):

$$C_D = \frac{24}{Re} \cdot \left(1 + \frac{1}{6} \cdot Re^{2/3}\right), \quad (5)$$

где Re – число Рейнольдса для относительного движения частицы.

Для диапазона $Re = 50-300$ с учетом ускорения движения частиц диаметром ~ 30 мкм при прохождении в потоке газа слабых ударных волн определим по формуле [2] (зависимость Рудингера):

$$C_D = 6000 \cdot Re^{-1,7}. \quad (6)$$

В свою очередь, число Рейнольдса для относительного движения частицы определяется диаметром частицы d_q и кинематической вязкостью ν_2

$$Re = d_q \cdot (v_r - v_q) / \nu_2. \quad (7)$$

Учитывая, что динамическая вязкость газа $\mu_r = \rho_r \cdot \nu_r$, подставив эти выражения (5) и (6) в уравнение (1) получим соответственно:

$$\frac{dv_q}{dt} = \frac{18 \cdot \mu_r \cdot (v_r - v_q)}{\rho_q \cdot d_q^2} + \frac{3 \cdot \mu_r^{1/3} \cdot \rho_r^{2/3} \cdot (v_r - v_q)^{5/3}}{\rho_q \cdot d_q^{4/3}}, \quad (8)$$

$$\frac{dv_q}{dt} = \frac{4500 \cdot \rho_r^{-0,7} \cdot \mu_r^{1,7} \cdot (v_r - v_q)}{\rho_q \cdot d_q^{2,7}}. \quad (9)$$

Будем предполагать, что испарение и дробление частиц отсутствует, то есть будем считать, что $d_q = \text{const}$. Также будем считать постоянной величиной динамическую вязкость μ_2 . Предполагаем, что изменение параметров в бегущей волне происходит адиабатически, тогда выражение для плотности будет иметь вид:

$$\rho_r = \rho_{om} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{v_{пер}}{c_{om}}\right)^{2/(\gamma-1)}, \quad (10)$$

и аналогично для давления:

$$P = P_{om} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{v_{пер}}{c_{om}}\right)^{2/(\gamma-1)}, \quad (11)$$

при этом ρ_{om}, P_{om} – средние по рассматриваемому участку значения плотности и давления среды; $P_{om} \cong 0,1$ МПа. Поскольку $P/\rho = R \cdot T$, где R – газовая постоянная среды, то

$$\frac{P}{\rho} = \frac{P_{om}}{\rho_{om}} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{v_{пер}}{c_{om}}\right)^\gamma = R \cdot T_{om} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{v_{пер}}{c_{om}}\right)^\gamma = R \cdot T, \quad (12)$$

откуда

$$T = T_{om} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{v_{пер}}{c_{om}}\right)^\gamma, \quad (13)$$

где T_{om} – среднее значение температуры в рассматриваемом участке потока.

Ограничимся рассмотрением пульсаций скорости с амплитудой $v_a \leq 0,5 \cdot v_{om}$. Поскольку рассматривается дозвуковой плазмотрон с цилиндрическим соплом, то число Маха $M \leq 0,5$, тогда $\frac{v_{пер}}{c_{ом}} \leq 0,25$. Это приводит к пульсациям температуры в бегущей волне в начальном участке плазменной струи с амплитудой $T_a \approx 1,06 \cdot T_{om}$. Аналогичные рассуждения для других участков приводят к тому, что амплитуда пульсаций температуры в бегущей волне уменьшается вдоль потока и в основном участке плазменной струи не превышает 3 % от среднего значения. Аппроксимация зависимости динамической вязкости μ_2 воздуха от температуры в диапазоне до $\sim 10 \cdot 10^3 \text{ K}^0$ имеет вид:

$$\mu_r = 2,73 \cdot 10^{-8} T_r \quad (14)$$

Отсюда видно, что пульсации температуры в бегущих волнах потока приводят к пульсациям динамической вязкости с такой же относительной величиной, не превышающей 6 % от среднего значения. Окончательный вид дифференциальных уравнений скорости движения частиц в потоке плазмы будет иметь вид:

$$\frac{dv_q}{dt} = A_0 \cdot (v_{om} + v_{пер} - v_q) + A_1 \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{v_{пер}}{c_{ом}}\right)^{4/3(\gamma-1)} \cdot (v_{om} + v_{пер} - v_q)^{5/3}, \quad (15)$$

$$\frac{dv_q}{dt} = A_2 \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} \cdot \frac{v_{пер}}{c_{ом}}\right)^{-1,4/(\gamma-1)} \cdot (v_{om} + v_{пер} - v_q)^{0,3}, \quad (16)$$

где d_q – диаметр частицы, ρ_q – плотность материала частицы, μ – динамическая вязкость; A_0 – величина, определяемая диаметром напыляемых частиц, плотностью, динамической вязкостью для начального участка движения частиц в потоке плазмы, значение этой величины имеет следующий вид; $A_0 = \frac{18 \cdot \mu_r}{\rho_q \cdot d_q^2}$; A_1 – величина, определяемая диаметром напыляемых частиц, плотностью, динамической вязкостью для переходного участка движения частиц в потоке плазмы, значение этой величины имеет следующий вид; $A_1 = \frac{3 \cdot \mu_r^{1/3} \cdot \rho_{om}^{2/3}}{\rho_q \cdot d_q^{4/3}}$; A_2 – величина, определяемая диаметром напыляемых частиц, плотностью, динамической вязкостью для основного участка движения частиц в потоке плазмы, значение этой величины будет таким: $A_2 = \frac{4500 \cdot \mu_r^{1,7} \cdot \rho_{om}^{-0,7}}{\rho_q \cdot d_q^{2,7}}$ v_q – скорости движения частицы в по-

токе плазмы, $v_{пер}$ – функция координаты по времени (скорости) потока плазмы для переходного участка плазменной струи, $v_{ом}$ – функция координаты по времени (скорости) потока плазмы для основного участка плазменной струи. При моделировании процессов в плазменной струе дифференциальные уравнения движения частиц решаются численными методами, в частности, модифицированным методом Эйлера второго порядка.

Выводы:

Построенная математическая модель позволит теоретически определить параметры технологического процесса плазменного напыления для достижения высокоскоростного потока расплавленных (с минимальным перегревом) напыляемых частиц, что необходимо для формирования качественных покрытий с высокой прочностью сцепления напыленного материала с основой.

Библиографический список

1 Кадырметов, А. М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров [Текст] : монография. – Воронеж : Научная книга, 2013. – 260 с.

2 Донской А. В. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении [Текст] / А. В. Донской, В. С. Клубникин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1979. – 221 с.

3 Кадырмегов, А. М. Перспективы упрочнения покрытий методом плазменного напыления с одновременной электромеханической обработкой [Текст] / А. М. Кадырмегов, В. О. Никонов, В. Н. Бухтояров, Е. В. Снятков, А. Ф. Мальцев // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта : теория и практика : В 2 частях : материалы 14-й международной научно-практической конференции. Часть 1 – СПб : Изд-во политехи, ун-та, 2012. – С. 75-79.

4 Багмутов, В. П. Исследование структуры и свойств наноматериалов, полученных комбинированной обработкой [Текст] / В. П. Багмутов, В. И. Калита, И. Н. Захаров и др. // Известия ВолГТУ. – Волгоград, 2008. – № 10. – С. 102-106.

5 Пат. 2338005 МПК С23С4 / 18 Способ комбинированного упрочнения деталей [Текст] / В. П. Багмутов, В. И. Калита, С. Н. Паршев, И. Н. Захаров ; заявитель и патентообладатель ВолГТУ. – № 2006145603 / 02; заявл. 20.12.2006 ; опубл. 10.11.2008.

6 Кадырмегов, А. М. Исследование процессов плазменного нанесения и

упрочнения покрытий и пути управления их качеством / А. М. Кадырмегов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар : КубГАУ, 2012. – № 07(81). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/07/pclf/25.pdf>, 1,125 у.п.л. – Загл. с экрана.

7 Станчев, Д. И. Математическая модель расчета температурного поля при плазменном напылении с одновременным оплавлением выносной модулируемой дугой цилиндрических деталей [Текст] / Д. И. Станчев, А. М. Кадырметов, В. Н. Бухтояров // Современные методы подготовки специалистов и совершенствование систем и средств наземного обеспечения авиации : международный сборник научно-методических трудов (часть 1) – Воронеж, ВВАИИ, 2003. – С. 83-88.

8 Кочергин, К. К. Контактная сварка [Текст] / К. К. Кочергин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние. 1987. – 240 с.

9 Кадырметов, А. М. Оценка качества плазменных покрытий, нанесенных комбинированным методом с обкаткой роликом, полученная на основе компьютерного моделирования / А. М. Кадырмегов, В. И. Посмегьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – №87(03). – Режим доступа: <http://ei.kuhagro.ru/2013/03/pdf/30.pdf>. 0,813 упл. – Загл. с экрана.

10 Hafner J. Atomic-Scale Computation Materials Science // Acta Mater. – 2000. – Vol. 48. – P. 71-92.

11 Premoze S., Tasdizen T., Bigler J. et al. Particle Based Simulation of Fluids // Euro-graphics, 2003. – Vol. 22. – № 3. – P. 103-113.