

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ЧАСТИЦ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ В СОСТАВЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ СМЕСИ ПОРОШКОВ

Калиниченко А.С., Кривошеев Ю.К., Мешкова В.В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,  
vera.miashkova2015@gmail.com

Повышение эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей является важной научной и практической задачей. Представляет интерес ввод в напыляемую смесь самофлюсующегося сплава CP4 керамических порошков на основе оксида алюминия. Для определения влияния объемной доли керамических порошков на изменение температуры потока частиц важно провести математическое моделирование, позволяющее выбрать оптимальные режимы плазменного напыления. Вопросы моделирования процесса плазменного напыления представляют значительный интерес, поскольку не существует универсальных моделей, описывающих процесс напыления. Например, важным аспектом является анализ изменения температуры потока частиц при наличии в них керамической фазы, которая характеризуется высокой температурой плавления. Математическое моделирование в данном случае, учитывает ряд упрощений:

1. Частицы по объему потока распределены равномерно и не происходит расслоения по плотности на протяжении полета.
2. Смесь порошков вводится в струю плазмы у среза плазматрона.
3. Не происходит изменения траектории струи плазмы и порошкового материала.
4. Свойства плазмы не меняются при снижении температуры.

Смесь напыляемого материала состоит из самофлюсующегося никель-хромового порошка ПГ-ХН80СР4 и оксида алюминия  $Al_2O_3$  с объемной концентрацией  $Al_2O_3$  от 5 до 50%. Диаметр частиц порошков в расчетах принят равным 100 мкм, расстояние от плазматрона до поверхности 100 мм. Скорость плазмообразующего газа (азот) 47 м/с, объемный расход газа 40 л/мин, массовый расход порошка 5 кг/ч. Для повышения износостойкости и снижения стоимости напыляемой смеси, в самофлюсующийся сплав вводился порошок оксида алюминия. Расчеты проводились для объемной концентрации керамики  $Al_2O_3$  от 5 до 50% и для температуры плазмы на выходе из плазматрона в интервале от 6000 до 10000 К.

Уравнения изменения температур частиц и газа с учётом конвективного теплообмена имеют следующий вид:

$$m_1 c_1 u \frac{dT_1}{dy} = \alpha F (T_3 - T_1), \quad (1)$$

$$m_2 c_2 u \frac{dT_2}{dy} = \alpha F (T_3 - T_2), \quad (2)$$

$$M c_3 u \frac{dT_3}{dy} = \alpha F [n_1 (T_1 - T_3) + n_2 (T_2 - T_3)], \quad (3)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – масса частиц;  $c_1$  и  $c_2$  – удельные теплоёмкости материалов;  $T_1$  и  $T_2$  – температура частиц;  $F$  – площадь поверхности частиц;  $M$ ,  $c_3$ ,  $T_3$  – массовый расход, удельная теплоёмкость и температура газа;  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена;  $u$  – скорость потока газа и частиц;  $y$  – расстояние от среза сопла плазматрона;  $n_1$  и  $n_2$  – число частиц никелевого сплава и керамики, взаимодействующих с потоком газа.

Форма уравнений (1) и (2) близка к уравнениям, приведенным в работе [1]. Коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha$  выражается следующим образом:

$$\alpha = \frac{\lambda}{D} Nu,$$

где  $\lambda$  – теплопроводность газа;  $D$  – диаметр частиц;  $Nu$  – число Нуссельта, определяющее конвективный теплообмен поверхности частицы с обтекающим её потоком газа.

В случае обтекания сферической частицы равномерным потоком с постоянными свойствами можно, воспользоваться известной зависимостью Ранца-Маршалла:

$$Nu = 2 + 0,6 \cdot Re^{0,5} Pr^{0,33}.$$

Уравнения (1 – 3) можно упростить, подставив значения массы и площади частиц:

$$\begin{aligned} \frac{dT_1}{dy} &= \frac{6\alpha}{c_1^* u D_1} (T_3 - T_1), \\ \frac{dT_2}{dy} &= \frac{6\alpha}{c_2^* u D_2} (T_3 - T_2), \\ \frac{dT_3}{dy} &= \frac{6\alpha m}{c_3^* u M \rho_1} \left[ \frac{1-x}{D_1} (T_1 - T_3) + \frac{x}{D_2} (T_2 - T_3) \right]. \end{aligned}$$

Полученная система уравнений решалась численно в пакете Mathcad стандартной процедурой с использованием функции Rkadapt – решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты с автоматическим выбором шага.

В случае, когда замена осуществляется объёмными долями, масса материала, вводимого в поток, уменьшается, так как плотность основного компонента (самофлюсующийся сплав) более чем в два раза превышает плотность керамики. При этом объёмные удельные теплоёмкости (произведение плотности на удельную массовую теплоёмкость) отличаются незначительно, так как:

$$\rho_1 c_1 = c_1^* = 4,8332 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}), \quad \rho_2 c_2 = c_2^* = 4,7697 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

То есть, различие в произведениях плотности на теплоемкости не превышает 1,5%. Поэтому доля керамики в смеси, как показали расчёты, не влияет значительно на характер распределения и значения температуры (рисунок 1). При увеличении объёмного содержания керамики в смеси от 5 до 50 % температура частиц оксида алюминия снижается только на 50-60°C, т.е. на 2,3-3,0 %. Более значительно температура частиц зависит от температуры плазмы.

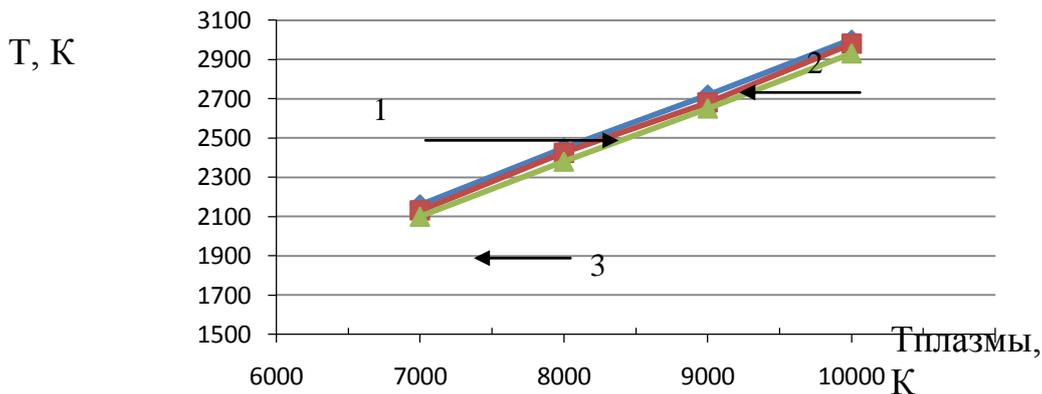


Рисунок 1 – Влияние температуры плазмы на выходе из плазмотрона на температуру частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в момент их соприкосновения с поверхностью образца для различного объёмного содержания керамики в смеси: 1 – 5% керамики, 2 – 25% керамики, 3 – 50% керамики; диаметр частиц – 100 мкм.

Анализ результатов расчета (рисунок 1) показывает, что при росте температуры плазмы от 7000 К до 10000 К температура частиц керамики возрастает примерно на 800 градусов. При размере частиц керамики 100 мкм они достигают температуры плавления при температуре плазмы не ниже 7400 К при концентрации 5% и 7700 К – для концентрации 50%.

Анализ расчетов изменения температуры на различном расстоянии от среза плазмотрона показал, что заметное различие температуры металлических и керамических частиц наблюдается на расстоянии более 5 см от выходного отверстия, когда температура самых нагретых частиц выше на 10 градусов менее нагретых. Зависимость температуры частиц керамики и самофлюса имеет экспоненциальный характер (рисунок 2). Причем, для всего диапазона расчетных величин температура самофлюсующегося порошка при контакте с основой превышает температуру плавления.

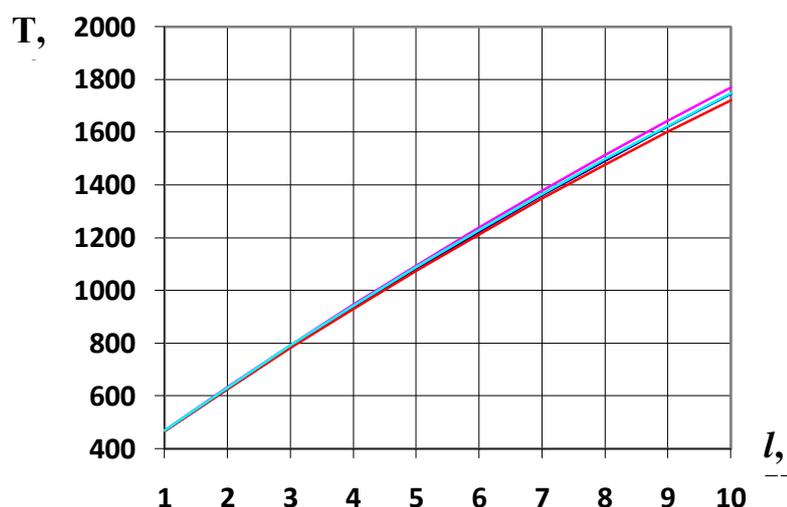


Рисунок 2 – Расчетное изменение температуры составляющих смеси от момента ввода в плазму до соприкосновения с подложкой для частиц размером 100 мкм и температуры плазмы 6500 К.

Анализ результатов расчета показывает, что средняя объемная температура потока снижается примерно на 15 градусов при увеличении доли керамических частиц от 5 до 25%. Следствием снижения температуры потока может быть ухудшение адгезии наносимого слоя к подложке, а также более слабая связь между частицами никель-хромового сплава и окиси алюминия.

### Список литературы

1. Nejat Y. Sari, Muharrem Yilmaz. Improvement of wear resistance of wire drawing rolls with Cr–Ni–B–Si+WC thermal spraying powders // Surface & Coatings Technology. 2008. -Vol. 202. - p. 3136–3141.