

ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАЙНОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЧАСТИЦ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

¹Андрейцев А.Ю., ²Смирнов И.В., ³Долгов Н.А.

¹Государственный экономико-технологический университет транспорта, Киев, Украина

²Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев, Украина

³Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Технологии газотермического напыления широко используются для получения многофункциональных покрытий из широкого диапазона материалов. При этом важную роль играет установление оптимального температурного режима частиц напыляемого порошка. Для обеспечения надежной прочности сцепления данных покрытий необходимо, чтобы напыляемые частицы достигали поверхности основы в расплавленном, но не перегретом до температуры испарения состоянии. Этим вызвана необходимость построения и исследования эффективных математических моделей определения температуры частицы в процессе напыления.

Аналитическому определению температуры сферической частицы посвящена работа [1], в которой рассмотрена третья краевая задача для уравнения теплопроводности. Однако, в данной работе авторы ограничились случаем, постоянной температуры плазменного потока. В [2] проведено исследование изменения температуры в предположении, что температура плазменной струи аппроксимируется квадратичным полиномом, а также установлено необходимое количество членов ряда для обеспечения требуемой точности. В [3] предложен комплексный подход к определению температуры напыляемых частиц, учитывающий изменение их агрегатного состояния в процессе полета. В [4] для увеличения точности расчётов предложено разбиение дистанции напыления на участки, на каждом из которых температура плазменной струи достаточно точно аппроксимируется квадратичным полиномом. Но, к сожалению, при переходе от одного участка к другому, аппроксимирующая температуру плазмы функция, терпит разрыв, что может повлиять на адекватность модели.

Таким образом, возникает задача аппроксимации температуры плазмы непрерывной функцией и построения аналитического решения полученной краевой задачи. Полученное решение в дальнейшем используется для установления режимных параметров плазмотрона задающих начальную температуру и скорость плазменной струи, а также дистанции напыления и размера напыляемых частиц, при которых обеспечивается максимальная прочность сцепления покрытия с основой.

При построении математической модели определения температуры частицы в плазменном потоке будем считать, что частица является однородным шаром.

Поскольку частица в потоке подвержена вращательному движению и температура плазмы в ее окрестности постоянна, то поток тепла через поверхность одинаков в каждой её точке, и можно считать, что распределение температур в частице зависит только от расстояния до её центра и времени пребывания в потоке, т.е.

$$T = T(r, t), 0 \leq r \leq R, t \geq 0.$$

В этих предположениях температура частицы может быть найдена как решение одномерного уравнения теплопроводности для шара при условии, что в начальный момент времени температура частицы: $T(r, 0) = T_0 = const$, а на её поверхности происходит конвективный теплообмен с плазмой, температура которой $T_g(t)$ зависит от времени пребывания частицы в плазменной струе.

Таким образом, для решения задачи необходимо иметь аналитическое выражение для определения изменения температуры плазмы вдоль дистанции напыления. Однако, решение этой задачи получено не было. На основе численного определения температуры плазмы, предлагается использовать для аппроксимации $T_g(t)$ эрмитовы кубические сплайны, которые по построению являются непрерывными на заданном интервале. Для этого зададим на дистанции напыления неравномерное разбиение $0 = z_0 < z_1 < z_2 < \dots < z_N = L$, исходя из имеющихся данных о температуре плазмы $T_g(z_j)$ в точках z_j , $j = \overline{0, N}$ и определим время, за которое преодолет расстояние z_j частица. В результате, мы проводим согласование времени пребывания частицы в плазменной струе с температурой плазмы в её окрестности:

$$T_g(t_j) = T_g(z_j)$$

на отрезке $0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_N = t(L)$,

где $t(L)$ – общее время полета частицы от места ввода в плазменную струю до поверхности основы.

После чего, применяя метод Фурье, получено решение:

$$T = T_g(t) - 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin k_i - k_i \cos k_i}{k_i - \sin k_i \cos k_i} \frac{\sin \frac{k_i r}{R}}{\frac{k_i r}{R}} \times \left((T_g(0) - T_0) e^{-\frac{a^2 k_i^2 t}{R^2}} + \sum_{j \geq 0} (\eta(t - t_j) - \eta(t - t_{j+1})) I_{j, k_i} \right),$$

где $I_{j, k_i} = \int_{t_j}^t P'_{3j}(\tau) e^{-\frac{a^2 k_i^2 (t - \tau)}{R^2}} d\tau$, $\eta(t)$ – функция Хевисайда, $a^2 = \frac{\lambda}{c\rho}$; λ –

коэффициент теплопроводности частицы; c – теплоемкость частицы; ρ – плотность частицы; k_i – корни уравнения

$$tg k_i = \frac{k_i}{1 - Bi}$$

$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$ – число Био, α – коэффициент теплообмена между частицей порошка и газом.

Данное решение обеспечивает более высокую точность при определении температуры частиц в потоке по сравнению с полученным в [4]. Так как, определение температуры частиц порошка в процессе газотермического напыления является довольно сложной экспериментальной задачей, адекватность полученных результатов была подтверждена косвенными исследованиями с помощью “сплэт” теста и испытаниями покрытий на адгезионную прочность.

Аппроксимацию температуры плазмы кубическими сплайнами планируется применить к определению температуры частиц вдоль дистанции напыления с учётом изменения их агрегатного состояния, используя подход, предложенный в [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Лохов Ю.Н. Нагрев и испарение частиц в струе низкотемпературной плазмы/ Ю.Н. Лохов, В.А. Петруничев, А.А. Углов, И.И. Швыркова // Физ. и хим. обраб. материалов. — 1974. — №6. — С. 52-56.
2. Смирнов И.В. Моделирование процесса нагрева частиц порошка в плазменной струе при напылении композиционных покрытий/ И.В. Смирнов, А.Ю. Андрейцев, А.В. Чорний, В.И. Копылов // Вестник ХНТУ. – Херсон. – 2008. – №2(31). – С.449-455.
3. Андрейцев А.Ю. Аналітичне визначення температури частинок порошку при плазмовому напыленні композиційних покриттів / А.Ю. Андрейцев, М.М. Крюков, Т.В. Крижановська, Т.М. Семененко // Вестник ХНТУ. – Херсон, 2011. – №3(42) – С.33-37.
4. Андрейцев А.Ю. Нагрів та плавлення частинок порошку в плазмовому струмені/ А.Ю. Андрейцев, І.В. Смирнов, А.В. Чорний // Математичне та комп'ютерне моделювання Серія: Технічні науки: зб. наук. праць Кам'янець-Подільський національний університет, Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова. – 2011. – Вип.5. – С. 3-10.

International Conference «Tarapov Readings», Kharkov, March 1-15, 2016