

МОДЕЛЬ НАГРЕВА И ОПЛАВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ СТРУЕЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАБОЧЕГО ТЕЛА

Первышин А.Н., Винокуров М.В., Лапшин С.А.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Одним из перспективных направлений развития технологии машиностроения является нанесение на поверхность деталей антифрикционных, износостойких и коррозионностойких покрытий струей высокотемпературного рабочего тела (как правило, плазмы или продуктов сгорания химического топлива).

Как способ подачи материала покрытия в зону напыления, наряду с порошком, широкое распространение получил ввод в высокотемпературную струю проволоки или цилиндрических стержней с последующим их оплавлением и напылением на поверхность детали. При этом правильный выбор геометрических размеров и скорости подачи материала оказывает определяющее влияние на экономичность процесса и качество нанесения покрытия. Для оценки этого влияния в представленной работе предложена модель теплообмена цилиндрического стержня со струей рабочего тела.

Суммарный тепловой поток Q в материал будет определяться интегрированием локальных значений удельного теплового потока q по поверхности стержня F_c , обтекаемой струей, и численно должен быть равен тепловой мощности N , необходимой для нагрева и оплавления материала стержня:

$$Q = N;$$

$$Q = \int_{F_c} q dF_c; \quad N = m_c [r_c + c_c (T_{пл} - T_0)];$$

где m_c ; r_c ; c_c ; $T_{пл}$; T_0 - массовый расход, удельная теплота плавления, удельная теплоемкость, температура плавления и начальная температура материала стержня, соответственно.

$$q = \alpha (T_{рт} - T_c),$$

где α ; $T_{рт}$; T_c - коэффициент теплоотдачи, температура рабочего тела и температура поверхности стержня, соответственно.

Строго говоря, локальные значения этих величин переменны по поверхности теплообмена. Однако, в первом приближении, температуру рабочего тела можно считать постоянной и равной температуре струи до

взаимодействия со стержнем. Коэффициент теплоотдачи определяется соотношением:

$$\alpha = Nu \lambda_{рт} / d_c,$$

где $\lambda_{рт}$ и d_c - коэффициент теплопроводности рабочего тела и диаметр стержня соответственно, а для определений локальных значений числа Нуссельта Nu , можно записать:

$$Nu = \langle Nu \rangle f(\tau).$$

Осредненное по поверхности теплообмена число Нуссельта $\langle Nu \rangle$ можно рассчитать по достаточно надежным эмпирическим зависимостям [1]. В частности для поперечно обтекаемого цилиндра:

$$\langle Nu \rangle = c Pr^n Re^m,$$

где Pr и Re - числа Прандтля и Рейнольдса, а c , n , m - константы, зависящие от числа Рейнольдса.

Функция $f(\tau)$ учитывает окружающую неравномерность коэффициента теплоотдачи и должна удовлетворять соотношению:

$$\int_0^{\pi} f(\tau) d\tau = 1,$$

где τ - угол поворота относительно оси стержня. Вид этой функции будет определяться формой оплавленной поверхности и может быть получен аппроксимацией экспериментальных данных.

В линейном приближении можно принять:

$$f(\tau) = C_1 \tau + C_2,$$

где C_1 и C_2 - эмпирические константы.

Наибольшую неравномерность будет иметь температура поверхности стержня. Для её расчета целесообразно использовать дифференциальное уравнение теплопроводности в частных производных. Если представить фрагмент оплавленного стержня типичной формы с элементарным контрольным объёмом ($r dr dx$) с координатами (x, r, τ) в цилиндрической системе координат, где x - осевое, r - радиальное и τ - окружное направление, то можно рассмотреть баланс тепловых потоков для этого контрольного объёма. Опуская промежуточные выкладки, можно записать:

$$W \left(\frac{\delta T}{\delta x} \right) - \frac{\delta}{\delta x} \left(a \frac{\delta T}{\delta x} \right) - \frac{\delta}{\delta r} \left(a \frac{\delta T}{\delta r} \right) - \frac{1}{r^2} \frac{\delta}{\delta \tau} \left(a \frac{\delta T}{\delta \tau} \right) = 0,$$

или в векторной форме:

$$\operatorname{div} (W T - a \operatorname{grad} T) = 0,$$

где W – скорость подачи стержня в зону напыления, а T и a – локальные значения температуры и коэффициента температуропроводности материала стержня.

В настоящее время накоплен достаточно большой опыт численного решения таких уравнений [2]. Для расчета поля температур в объёме стержня необходимо задать граничные условия.

Ниже представлен один из вариантов задания таких условий:

- на поверхности плавления

$$T_c = T_{пл};$$

- на цилиндрической поверхности, обтекаемой струей

$$T_c = T_{рт} - q/\alpha;$$

- на цилиндрической поверхности за пределами струи

$$\delta T / \delta r = 0;$$

- в плоскости, перпендикулярной оси стержня и достаточно удаленной от поверхности теплообмена

$$\delta T / \delta x = 0.$$

Таким образом, предложенная модель нагрева и оплавления цилиндрического стержня струей высокотемпературного рабочего тела, с учетом термодинамических и теплофизических свойств последнего, позволяет расчетным путем выбрать оптимальную скорость подачи и диаметр стержня для обеспечения максимальной экономичности процесса и качества нанесения покрытия выбранным материалом на поверхность детали.

Список литературы

1. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. - М.: Энергомашиздат, 1990.- 367 с.: ил.
2. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена: Пер. с англ.- М.: Мир, 1988.- 544 с., ил.