

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДЛОЖКИ ОТ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СОПЛА ПРИ ХГН

С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, В.С. Шикалов

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

Введение. Холодное газодинамическое напыление – быстро развивающийся метод порошкового напыления, берущий свое начало с открытия явления образования покрытий при ударе нерасплавленных частиц металлов в ИТПМ СО РАН в начале 1980-х. При практическом использовании метода сплошное покрытие создается путем сканирования поверхности подложки двухфазной струей с некоторой заданной скоростью перемещения сопла. Поскольку температура поверхности подложки влияет на процесс напыления, то изучение ее зависимости от скорости перемещения сопла является актуальной задачей. В данной работе представлены предварительные (без учета вклада от частиц) экспериментальные и расчетные данные в типичном диапазоне изменения скоростей перемещения сопла (1-400 мм/с) и температур торможения воздуха (200-600 С), встречающихся в практике напыления.

Экспериментальная схема. Измерения проводились с помощью сборки, состоящей из основы, к которой крепился слой керамического теплоизолятора, на который устанавливалась подложка из алюминия $50 \times 50 \times 1$ мм. Подложка прижималась стальной рамкой толщиной 1 мм также через керамический изолятор. Рамка имела прямоугольный вырез размером 40×20 мм, через который струя воздействовала на подложку. Перед подложкой и рамкой устанавливалась первая термопара (для измерения температуры струи). Заподлицо с поверхностью подложки симметрично относительно ее середины размещались вторая и третья термопары, расстояние между которыми было 20 мм. Параметры воздушной струи были: давление торможения 3 МПа, температура 200, 400 и 600 С. Использовалось осесимметричное профилированное сверхзвуковое сопло с расчетным числом Маха 3 (критический диаметр сопла 2,8, выходной 6,5 мм).

Моделирование. При моделировании подложка разбивается на кубики со стороны равной толщине подложки. Рассматриваются относительно тонкие подложки, толщина которых во много раз меньше характерных размеров в плане, т.е. предполагается, что градиент температуры по толщине подложки пренебрежимо мал. В каждом кубике на первом шаге вычисляются потоки тепла через его грани:

$$qx_{i,j} = -\lambda h \cdot dy \frac{T_{i,j} - T_{i-1,j}}{dx}, \quad qy_{i,j} = -\lambda h \cdot dx \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{dy}, \quad qw_{i,j} = -\alpha \cdot dx \cdot dy (T_0 - T_{i,j}),$$

$T_{i,j}$ – температура подложки, λ – теплопроводность подложки, h – толщина подложки, α – коэффициент теплообмена между струей и подложкой, T_0 – температура торможения струи.

Для осесимметричной струи распределение коэффициента теплообмена и температуры торможения вдоль поверхности подложки берется в виде:

$$T_0(r) = \frac{T_{00}}{\left(1 + 15 \left(\frac{r}{r_T}\right)^2\right)^{0.25}}, \quad \alpha(r) = \frac{\alpha_0}{\left(1 + 15 \left(\frac{r}{r_\alpha}\right)^2\right)^{0.25}},$$

T_{00} – температура торможения в форкамере, α_0 – коэффициент теплообмена на оси струи, r_T – характерная координата уменьшения температуры торможения в 2 раза по сравнению с температурой на оси, r_α – аналогичная величина для коэффициента теплообмена. В расчете приняты $\alpha_0 = 7 \cdot 10^3$ Вт/К м², $r_T = 25$ мм, $r_\alpha = 4$ мм. Последние две величины взяты на основании ранее проведенных исследований [1]. Что касается α_0 , то в расчете его величина подбиралась, чтобы добиться наилучшего совпадения результатов измерений при температуре струи 400 С. Однако далее во всех представленных случаях расчета она была постоянной.

На втором шаге расчета вычисляются средние температуры подложки:

$$T_{i,j}^{k+1} = T_{i,j}^k + \left(qx_{i,j} - qx_{i+1,j} + qy_{i,j} - qy_{i,j+1} + qw_{i,j} \right) \frac{dt}{c \rho h \cdot dx \cdot dy},$$

c – теплоемкость подложки, ρ – плотность подложки, k – число шагов по времени.

В случае движения сопла с постоянной скоростью u_n радиус в распределениях температуры торможения и коэффициента теплообмена рассчитывается по формуле:

$$r_{i,j} = \sqrt{(x_i - s)^2 + (y_j - Ly/2)^2}, \quad s = u_n \cdot k \cdot dt.$$

Результаты. На рис. 1 представлены данные экспериментов и расчетов для трех разных температур торможения воздуха. Температуры брались как средние между максимальными показаниями двух термопар. Видно, что в логарифмических координатах по скорости перемещения сопла наблюдается почти линейная зависимость. Отклонение от этой зависимости имеет место в самых крайних точках.

Было также проведено обобщение полученных данных. Была выбрана референтная скорость перемещения сопла 10 мм/с, а температура подложки при этой скорости была выбрана как базовая. Все температуры были отнесены к этой базовой температуре. Значения базовой температуры равны 97,8, 209,5 и 321,25 С для температур торможения воздуха 200, 400 и 600 С, соответственно. Как можно видеть, в первом приближении можно оценить базовую температуру как половину температуры торможения.

Результаты расчетов и экспериментов в диапазоне температур торможения 400 и 600 С совпадают с хорошей точностью. При температуре торможения 200 С наблюдается некоторое отличие (не превышающее 30-35 С).

Таким образом, для практических оценок можно пользоваться простыми соотношениями, полученными в результате проделанной работы:

$$\Delta T_s \approx 0,5 T_{00} \left(1 - 0,556 \cdot \lg(u_n / u_{nr}) \right), \quad \text{где } u_{nr} = 10 \text{ мм/с.}$$

Эти соотношения верны только для условий проведения экспериментов: тонкая (1 мм толщиной) алюминиевая теплоизолированная подложка, закрепленная прижимной рамкой с прорезью. При использовании более толстых подложек, закрепленных без теплоизоляции, можно ожидать более низкие температуры подложек. Поэтому полученные здесь величины следует принимать как максимально возможные, по крайней мере, для алюминиевых подложек.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00538\19 с использованием оборудования ЦКП "Механика" (ИТПМ СО РАН).

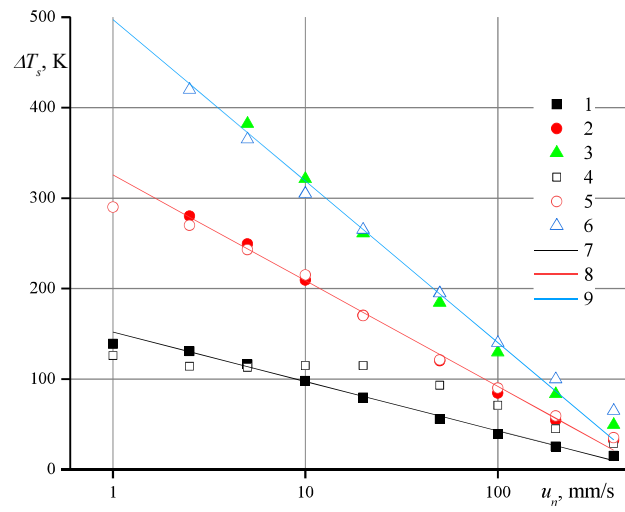


Рис. 1. Зависимость температуры подложки от скорости перемещения сопла.
 1-3 результаты численных расчетов, 4-6 результаты экспериментов,
 7-9 аппроксимации; 1, 4, 7 температура торможения 200 C, 2, 5, 8 – 400 C, 3, 6, 9 – 600 C.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S., Alkhimov A., Fomin V. Cold Spray Technology, Amsterdam, Elsevier Science, 2007.