

УДК 621.793.74:681.3.06

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ И НАГРЕВА ЧАСТИЦ ПОРОШКА В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.П. КУНДАС, Д.В. МАРКОВНИК, В.А. ГУРЕВИЧ, И.Н. ЦЫРЕЛЬЧУК

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Представлена разработанная трехмерная модель движения и нагрева частиц порошка, которая предусматривает расчет температурных полей для каждого возможного фазового состояния материала частиц и учитывает процесс их испарения. Модель практически реализована в составе программного комплекса PLASMA 2002. С применением данного программного комплекса проведены исследования особенностей движения и нагрева частиц порошка из оксида алюминия при плазменном напылении покрытий в атмосферных условиях.

Введение. Методы компьютерного моделирования процесса плазменного напыления покрытий позволяют получить максимальный объем информации об изучаемом процессе при минимуме дорогостоящих экспериментальных исследований [1].

Одной из важных задач моделирования процессов плазменного напыления покрытий является описание динамики нагрева и движения частиц порошка в плазменной струе [2].

Краткое описание модели. Для математического описания ускорения и траектории движения частиц порошка в плазменной струе на основании второго закона Ньютона были получены выражения для каждой из проекций скорости на оси X, Y и Z. Следует отметить, что в плазменной струе на частицу действуют следующие силы: аэродинамического сопротивления; тяжести; Магнуса; термофареза. Из всех вышеперечисленных сил в результирующих уравнениях учитывалась только сила аэродинамического сопротивления, так как все остальные составляющие пренебрежимо малы, по сравнению с последней.

Частицы нагреваются в плазменной струе под действием конвективного и лучистого теплообмена:

$$Q = Q_r + Q_c = \delta_B \epsilon_p (T_g^4 - T_{ps}^4) + Nu \cdot \lambda_g \cdot \frac{T_g - T_{ps}}{\pi d_p},$$

где Nu – число Нуссельта; λ_g – теплопроводность газа; d_p – диаметр частицы; T_{ps} – температура частицы на поверхности; T_g – температура окружающего газа, ϵ_p – нормализованный коэффициент излучения; δ_B – постоянная Стефана – Больцмана.

С учетом траектории движения каждой из инжектированных в плазменную струю частиц (инжекция частиц моделировалась с помощью генератора псевдослучайных чисел, учитывалось также их распределение по сечению инжектора) рассчитывалось тепловое поле по сечению частицы, движение фронта испарения и кристаллизации (при охлаждении).

Выбор модели испарения существенно зависит от давления окружающего газа. Для низких давлений использован закон Герца - Кнудсена [3], для атмосферных давлений - была адаптирована модель, предложенная в работах Найта [4].

В зависимости от траектории движения в плазменной струе и скорости, частицы порошка могут находиться в различном фазовом состоянии (твердая фаза; твердая - жидкая фаза; жидкая фаза; твердая - жидкая - твердая; жидкая - твердая), что потребовало решения задач теплообмена, теплопроводности, испарения и кристаллизации (задача Стефана) для каждого из приведенных состояний.

Для решения краевой задачи построена чисто неявная, консервативная разностная схема на равномерной сетке из N_i узлов [5]. Совместное решение уравнений этой схемы напрямую невозможно, так как система нелинейна. В неё входят параметры, зависящие от температуры. Для решения этой системы уравнений был применён итерационный метод Ньютона.

Разработанная модель предусматривает также расчет распределения частиц порошка на основании, которое зависит от следующих параметров:

- начальной скорости каждой из частиц на срезе плазмотрона;
- распределения инжектируемых частиц по диаметру, который зависит от способа получения напыляемого порошка и чаще всего подчиняется нормальному закону распределения;
- координат частиц на срезе инжектора (рассчитаны, основываясь на стандартном распределении массы частиц вылетающих из инжектора);
- распределения скорости газа в плазменной струе.

Для практической реализации всех моделей разработан программный комплекс PLASMA 2002, который включает также базу данных свойств материалов и плазмообразующих газов и позволяет проводить сквозное моделирование всех упомянутых выше процессов с передачей данных от одной модели к другой [6].

Результаты моделирования и их анализ. Исследования произведены со следующими исходными данными:

- плазмообразующий газ - Ar 71 % H₂ 29 %;
- материал напыляемого порошка - оксид алюминия Al₂O₃;
- начальный диаметр частиц - 40 мкм, среднеквадратическое отклонение - 2 мкм;
- начальная скорость - 12 м/с, начальная температура - 300 К;
- дистанция напыления - 120 мм;
- в качестве характеристик незагруженной плазменной струи (распределения температуры и скорости) использовались данные, полученные с помощью программного комплекса Phoenics в Институте материаловедения Технического университета г. Аахена (Германия) [7].

Исследовалось влияние изменения диаметра и начальной скорости ввода частиц в плазменную струю:

- на траекторию движения частиц в плоскостях XY и YZ,
- скорость частиц в момент столкновения с поверхностью основания;
- температуру на поверхности частицы в момент столкновения с поверхностью основания;
- температуру в центре частицы в момент столкновения с поверхностью основания.

Проводился также анализ распределения частиц на поверхности основания (плоскость YZ) по диаметру, скорости, температуры на поверхности и в центре частицы. Некоторые результаты исследований приведены на рис. 1, 2.

Анализ результатов моделирования показывает, что в общем случае при плазменном напылении закономерности движения и нагрева частиц зависят от многих величин. Некоторые из них, например диаметр частиц, оказывают косвенное и очень сложное влияние. Более простым является влияние начальных условий напыления (например, положение инжектора, начальная скорость частиц). Рассмотрим более подробно особенности этих влияний.

Скорость частиц и температура их нагрева в основном зависят от траектории движения частицы в плазменной струе (включая термодинамические параметры плазменной струи), площади поверхности частицы и ее массы, времени нахождения частицы в плазменной струе. Между этими факторами имеется большая корреляция. Например, от траектории частиц зависит ее температура, скорость, время пребывания в струе. Последний фактор, в свою очередь, влияет на температуру, скорость испарения (диаметр). Если частицы порошка большую часть времени до столкновения с основанием движутся в центральной зоне плазменной струи, то они получают максимальное ускорение и тепловое воздействие. С другой стороны, в этом случае уменьшается время пребывания в этих условиях, и в итоге они могут нагреваться до меньших температур.

Отклонение частиц от осевого движения обусловлено следующими факторами: радиальной скоростью компонентов окружающего газа; вращательной составляющей, обусловленной особенностью плазменного разряда в плазмотроне, начальным импульсом частиц. Радиальная составляющая почти всегда направлена от оси плазматрона, за исключением небольшого участка у сопла плазматрона (за счет подсоса воздуха и турбулентности). При приближении к оси плазменной струи, за счет повышения температуры, вязкость газа увеличивается, соответственно, увеличивается сила лобового сопротивления. Таким образом, создается барьер, который может быть преодолен частицами с большим диаметром, имеющими большую инерционность, так как их масса увеличивается пропорционально третьей степени диаметра, а сила лобового сопротивления увеличивается пропорционально второй степени. Что касается частиц с меньшим диаметром, то их движению в плоскости YZ препятствует радиальная составляющая скорости струи. Эти частицы, как показали результаты моделирования, не достигают высокотемпературных и высокоскоростных участков струи, но время нахождения их в струе больше, поэтому они могут достигать больших скоростей и нагреваться до больших температур.

С другой стороны, тепловая энергия, получаемая частицей от плазменной струи, будет пропорциональна площади поверхности частицы, которая, в свою очередь, пропорциональна второй степени радиуса, масса же частицы пропорциональна третьей степени радиуса. Поэтому температура нагрева частицы должна уменьшаться с увеличением ее диаметра.

Что касается времени движения частицы в плазменной струе, то это однозначно определяется взаимодействием между силой лобового сопротивления и инерционностью движения частицы. Время движения будет возрастать почти линейно с увеличением диаметра частиц. Представляется возможным приблизительно предсказать это время, используя рис. 1. Для этого необходимо учесть некоторые усло-

вия. В общем случае время движения частицы будет величиной, обратной ее скорости, и для частиц с большим диаметром оно также будет большим. Интересен также тот факт, что имеет место линейный участок на рис. 1 (для диапазона частиц 35...80 мкм). Нелинейность других участков может быть объяснена различными условиями движения частиц в плазменной струе, особенно для легких фракций.

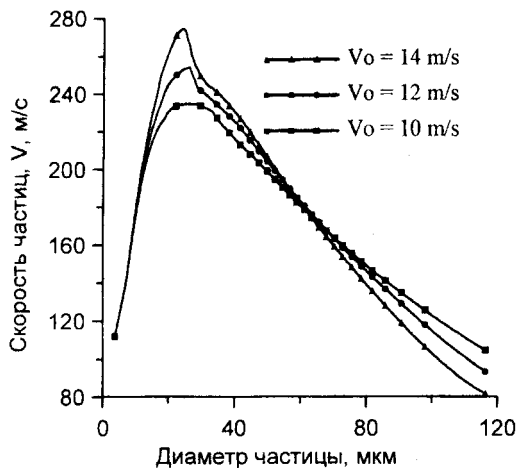


Рис. 1. Распределение скорости частиц, достигших координаты $X = 120$ мкм в зависимости от их диаметра

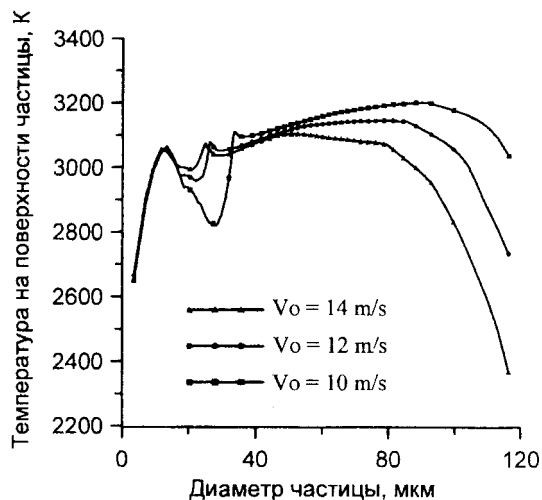


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности частицы у покрытия в зависимости от их диаметра

Максимальной скорости ($\approx 230...270$ м/с) достигают частицы с диаметром порядка 10...30 мкм). Последующее, почти линейное, уменьшение скорости частиц с увеличением их диаметра обусловлено инерционностью и увеличением силы лобового сопротивления.

Распределение температуры частицы на поверхности в зависимости от начального диаметра на покрытии имеет более сложный характер (см. рис. 2).

Несколько максимумов графика могут быть объяснены суперпозицией нескольких сложных процессов. Для легкой фракции первый максимум связан с вводом в плазменную струю. Причиной последующего минимума (диаметр частицы в промежутке 20...30 мкм) может быть увеличение скорости частицы (см. рис. 1.)

Для тяжелой фракции возрастание температуры обусловлено попаданием частиц на высокотемпературные участки плазмы и возрастанием времени нахождения на данных участках. Нагрев частиц с диаметром в диапазоне 50...80 мкм характеризуется явлением достижения высоких температур с последующим охлаждением. Движение частиц с диаметром более 100 мкм зависит в основном от начального импульса. Высокотемпературные участки плазмы достигаются без дополнительных трудностей, но покидают их частицы довольно быстро. Дополнительно второй фактор «поверхность частицы и ее масса» влияет очень значительно.

Стохастический характер ввода частиц обуславливает распределение частиц на поверхности основания. Если бы все начальные параметры были бы константами, то частицы имели бы одинаковую траекторию и попадали бы в одну и ту же точку на основании. В действительности существует несколько начальных распределенных параметров:

- начальной скорости;
- радиуса частицы (зависит от способа получения напыляемого порошка и подчиняется гауссовскому распределению);
- координат частиц в инжекторе (рассчитано основываясь на стандартном распределении массы частицы вылетающей из инжектора).

Имеется еще один очень важный фактор, который определяет распределение частиц на основании, - это нестационарный характер полей скоростей в струе.

Частицы большего диаметра (40... 100 мкм) при данных условиях напыления пересекают ось плазменной струи и переходят в периферийные зоны, что не обеспечивает им большой суммарный импульс от плазменной струи и скорость их при соударении с основанием минимальна (120...140 м/с). Максимально ускоряются и достигают высоких температур нагрева частицы, траектория которых пролегает вблизи оси плазменной струи.

Заключение. Разработаны трехмерные математические модели, описывающие ускорение и нагрев частиц порошка в плазменной струе с учетом их возможных фазовых состояний. Модели практически реализованы в составе программного комплекса Plasma 2002, с помощью которого проведены исследования особенностей нагрева и движения в плазменной струе частиц порошка и оксида алюминия различного диаметра. Показано, что оптимизацией траектории частиц в плазменной струе возможно обеспечить требуемые термокинетические условия их взаимодействия с основанием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кундас С.П., Кашко Т.А. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб. пособие: В 2-х ч. Ч. 1. - Мн.: БГУИР, 2002. - 164 с.
2. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники: В 3-х т. Т. 1 / А.П. Достанко, С.П. Кундас, М.Н. Босняков и др.; Под общ. А.П. Достанко. - Мн.: ФУАинформ, 2000. - 424 с.
3. Моделирование теплофизических процессов при импульсном лазерном нагреве металлов / А.А. Углов, И.Ю. Смуров, А.М. Лашин и др. - М.: Наука, 1991. - 228 с.
4. Knight C. Rapid Surface Vaporization With Back Pressure // AAIA Journal. - 1979. - V. 17, № 5. - P. 54 - 62.
5. Кашко Т.А., Гуревич В.А., Кундас С.П. Моделирование нагрева и испарения порошковых материалов в плазменном напылении покрытий // Материалы Всероссийской науч. конф. по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2001 - Петрозаводск, 2001 - Т. 2. - С. 83 - 91.
6. Program facilities for integrated simulation of coating plasma spraying / S. Kundas, V. Hurevich, S. Levashkevich et al. // Plasma Physics and Plasma Technology: Proc. of III Intern. conf. - Minsk, 2000.-V. 2.-P. 612-615.
7. Eritt U. Entwicklung und Validierung von Simulationsmodellen zur Optimierung der Prozessführung bei der Herstellung plasmagespritzter Wafermedaümschichten. - Aachen: Shaker, 2000. - 185 S.