

новлены зависимости потерь давления от массового расхода воздуха (рис. 6).

### ВЫВОД

Показано, что используемые методики экспериментальных исследований обеспечивают достаточную точность при исследовании интенсивности теплообмена между стенкой и потоком воздуха, а выполнение на внутренней поверхности каналов отдельных ребер малой высоты и отверстий для сообщения каналов в воздуховоде позволяет интенсифицировать теплоотдачу от стенки трубы к потоку воздуха.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Исаченко, В. П.** Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
2. **Dipprey, D. F.** Heat and momentum transfer in smooth and rough tubes at various prandtl numbers / D. F. Dipprey, R. H. Sabersky // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1963. – V. 6. – P. 329–353.

3. **Webb, R. L.** Heat transfer and friction in tubes with repeated-rib roughness / R. L. Webb, E. R. G. Eckert, R. J. Goldstein // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1971. – V. 14. – P. 601–617.

4. **Мулябин, К. Л.** Эффективность интенсификации теплообмена углублениями и выступами сферической формы / К. Л. Мулябин // Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – № 2. – С. 235–246.

5. **Watkinson, A. P.** Heat transfer and pressure drop of internally finned tubes in laminar oil flow / A. P. Watkinson, D. C. Miletto, G. R. Kubanek // ASME Paper 75-HT-41 1975.

6. **Преображенский, В. П.** Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

7. **Бажан, П. И.** Справочник по теплообменным аппаратам / П. И. Бажан, Г. Е. Каневец, В. М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

8. **Жукаускас, А. А.** Конвективный перенос в теплообменниках / А. А. Жукаускас. – М.: Наука, 1982. – 472 с.

9. **Chen, M. A.** An analytical study of laminar film condensation / M. A. Chen // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1961. – V. 83C. – P. 48–54.

Поступила 15.11.2005

УДК 621.793.18

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ ТИТАНОВОЙ ПЛАЗМЫ В СРЕДЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГАЗА

*Доктора техн. наук ИВАЩЕНКО С. А., ИВАНОВ И. А.,  
аспиранты СУЛТАН С. А., ГОЛУШКО В. М.*

*Белорусский национальный технический университет*

Эффективность использования изделий с защитным покрытием во многом определяется равномерностью осаждения этого покрытия на всей поверхности основы. Обеспечение равномерности толщины покрытия на поверхности упрочняемой заготовки особенно важно для тонких покрытий. Это связано с тем, что ряд параметров тонких покрытий, которые влияют на его эксплуатационные характеристики, зависят от толщины самих покрытий. К таким па-

раметрам относятся структура покрытия, кристаллографическая ориентация, твердость, шероховатость, плотность упаковки кристаллической решетки и др. Анализ показывает, что характерной особенностью вакуумно-плазменных технологий являются направленность ионно-плазменного потока и пространственное распределение его плотности. Поэтому для получения равномерного по толщине покрытия по всей поверхности заготовки задают ее пла-

нетарное вращение в вакуумной камере. Для деталей относительно простой геометрической формы это, как правило, автоматически обеспечивает достижение равномерности осаждения покрытия с относительно высокой скоростью. Однако осаждение покрытий на поверхности крупногабаритных, сложнопрофильных деталей или на внутренние поверхности втулок имеет ряд особенностей [1]. Это требует разработки простых и эффективных способов метода предварительной оценки базирования заготовок в технологической оснастке и выбора траектории ее движения в вакуумной камере. Одним из путей получения предварительных оценок является разработка компьютерных моделей на базе пакетов прикладных программ.

Цель данной работы – разработка программного модуля на базе пакета прикладных программ MATLAB для расчета скорости осаждения покрытия на поверхности основы при конденсации однокомпонентной плазмы в среде технологического газа с визуализацией результатов расчетов.

Скорость осаждения однокомпонентного плазменного потока, а следовательно, и толщина покрытий в среде технологического газа зависят от ряда технологических параметров: давления технологического газа, тока дуги напряжения и др. Для разработки программного модуля в качестве исходных данных использовали экспериментальные данные [2]. В качестве материала катода электродугового испарителя выбран титан ВТ1-0. Процесс осаждения покрытий проводили с использованием установки вакуумного напыления типа «Юнион» при давлении азота от  $2 \cdot 10^{-2}$  до  $2 \cdot 10^{-1}$  Па. Скорость осаждения титанового покрытия оценивалась профилометрическим методом (ГОСТ 9.302.88). Для решения задачи получения аналитического описания экспериментально полученных зависимостей эмпирические формулы подбирали в виде многочленов, степень которых заранее неизвестна. В MATLAB для построения численных алгоритмов нахождения коэффициентов интерполяционных полиномов используют метод неопределенных коэффициентов [3], для повышения точности интерполяции и построения трехмерных моделей – интерполяцию кубическими сплайнами. В последнем область (двухмерная поверхность

отклика) разбивается на отдельные участки в виде сетки. Интерполяция функции на каждом участке проводится полиномами третьей степени, которые сращиваются друг с другом в узлах сетки.

Исходные данные для интерполяции получены из графиков, приведенных на рис. 1. Каждая из линий соответствует току фокусирующей катушки от 0 до 1,5 А. Для простоты обработки результатов эксперимента в качестве горизонтальной координатной оси (ось X) брали направление от оси катода до наиболее удаленных точек вакуумной камеры в радиальном направлении. Вертикальная координатная ось (ось Y) – направление, вдоль которого измеряется толщина покрытия. Созданная функция MATLAB имеет следующий прототип:

*function height = height interpolate (x1, current),*

где  $(x1, current)$  – параметры, которые задают координаты основы ( $x1$ ) и величину тока (произвольное значение от 0 до 1,5 А).

$x(1:length(line1)) = line1(1:end,1);$

$x(length(line1) + 1:length(line1) + length(line2)) = line2(1:end,1);$

$x(length(line1) + length(line2) + 1:length(line1) + length(line2) + length(line3)) = line3(1:end,1);$

$x(length(line1) + length(line2) + length(line3) + 1:length(line1) + length(line2) + length(line3) + length(line4)) = line4(1:end,1);$

$y(1:length(line1)) = line1(1:end,2);$

$y(length(line1) + 1:length(line1) + length(line2)) = line2(1:end,2);$

$y(length(line1) + length(line2) + 1:length(line1) + length(line2) + length(line3)) = line3(1:end,2);$

$y(length(line1) + length(line2) + length(line3) + 1:length(line1) + length(line2) + length(line3) + length(line4)) = line4(1:end,2);$

$z(1:length(line1)) = line1(1:end,3);$

$z(length(line1) + 1:length(line1) + length(line2)) = line2(1:end,3);$

$z(length(line1) + length(line2) + 1:length(line1) + length(line2) + length(line3)) = line3(1:end,3);$

$z(length(line1) + length(line2) + length(line3) + 1:length(line1) + length(line2) + length(line3) + length(line4)) = line4(1:end,3).$

Координата  $x$  (–100–100) соответствует горизонтальной оси,  $y$  (0–16) – вертикальной,  $z$  (0–1,5) – оси, направленной перпендикулярно поверхности рисунка (рис. 1). Например, для

координат  $x = 60, y = 8, z = 0,7$  скорость осаждения покрытия определялось как

$$height = height\_interpolate(60, 0,7).$$

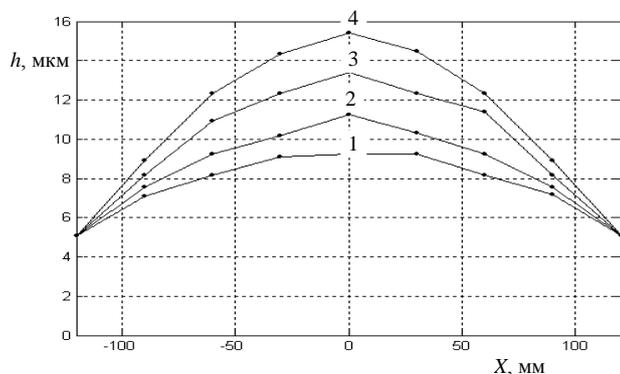


Рис. 1. Радиальное распределение толщины покрытия TiN на основе при различных токах фокусирующей катушки (поперечное сечение плазменного потока на расстоянии 300 мм от катода) [3]: 1 – 0; 2 – 0,5 А; 3 – 1,0 А; 4 – 1,5 А

Результатом выполнения функции *height* будет значение толщины покрытия для выбранной координаты и величины тока.

В данной части программного кода для построения трехмерного графика формируют массивы данных по каждой из трех осей – *X*, *Y* и *Z*. Для заполнения указанных массивов использованы числовые значения, полученные при оцифровке экспериментальных зависимостей.

Результат интерполяции функции *function height* может быть представлен в виде функции от двух координат  $height = f(x, y)$  с помощью следующей функции:

```
ZI = griddata(x,y,z,XI,YI,'v4');
mesh(XI,YI,ZI), hold
plot3(x,y,z,'o'), hold off.
```

Для визуализации полученного результата интерполяции необходимо использовать в MATLAB файл *data.m*. Результат визуализации позволяет получить семейство кривых, описывающих зависимость скорости осаждения покрытия от тока фокусирующей катушки в виде 3-D изображения (рис. 2). В виде сетки показан результат интерполяции. Визуализированная модель расчета демонстрирует рост плотности ионно-плазменного потока вдоль оси испарителя и сужение этого потока с ростом тока фокусирующей катушки.

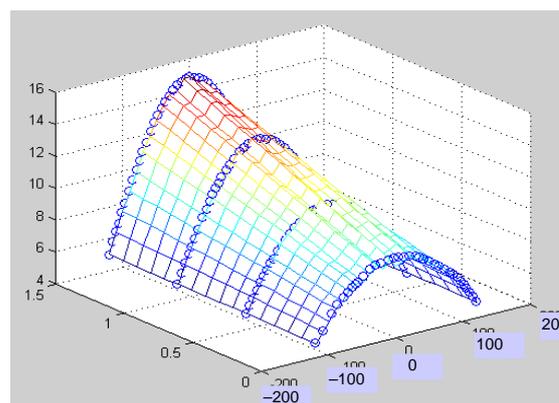


Рис. 2. Графическая модель распределения толщины покрытия TiN на подложке при различных токах фокусирующей катушки

Полученные результаты интерполяции могут быть скорректированы в зависимости от условий осаждения ионно-плазменного потока на поверхность детали. Так, экспериментально установлено, что с возрастанием тока дуги увеличивается скорость конденсации покрытия. Наиболее значительное увеличение данного показателя можно наблюдать при токах более 90–100 А, что объясняется увеличением доли капельной фазы в продуктах эрозии катодного материала. Рост ускоряющего потенциала способствует незначительному уменьшению скорости конденсации покрытия и объясняется распыляющим эффектом. Повышение давления реактивного газа в пределах  $2 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-1}$  Па вызывает немонотонное изменение скорости конденсации [2].

Для интерполяции экспериментально полученных результатов выбран полином следующего вида:

$$P = \sum \omega_i (y_i - f(x_i))^2 + (1 - p) \int_{X_0}^{X_1} (f')^2 dx, \quad (1)$$

где функция *P* представлена в виде суммы ортогональных многочленов, степень которых заранее неизвестна. В качестве многочленов *P(i)* в MATLAB используют ортогональные многочлены Лежандра

$$P(h) = P(1) X^N P(2) X + P^{(N+1)}, \quad (2)$$

где *X* – один из изменяемых корректирующих факторов (ток дуги, ускоряющий потенциала

или давление);  $h$  – скорость роста покрытия, мкм/мин;  $N$  – положительное целое.

Например, результаты экспериментальных исследований, описывающие уменьшение скорости роста толщины покрытия с удалением от поверхности катода вдоль оси испарителя, могут быть описаны интерполяционными полиномами и математическими зависимостями. Так, для тока дугового разряда скорость роста покрытия

$$h_1 = 1 \cdot 10^{-5} X^3 - 2 \cdot 10^{-4} X + 0,561, \text{ мкм/мин,}$$

где  $X$  – величина тока дугового разряда, А.

Для отрицательного ускоряющего потенциала  $U_{\text{оси}}$  зависимость  $h_2$  можно описать следующим уравнением:

$$h_2 = 1 \cdot 10^{-5} U_{\text{оси}}^3 - 2 \cdot 10^{-4} U_{\text{оси}}^2 - 6 \cdot 10^{-3} U_{\text{оси}} + 0,682, \text{ мкм/мин.}$$

Для давления технологического газа  $p$  зависимость  $h_3$  можно описать следующим уравнением:

$$h_3 = 1 \cdot 10^{-4} p^3 - 5 \cdot 10^{-4} p^2 - 8,8 \cdot 10^{-3} p + 0,694, \text{ мкм/мин.}$$

Используя полученные уравнения и интерполяционную модель, можно рассчитать толщину осажденного покрытия с учетом положения основы в вакуумной камере.

Созданная функция MATLAB имеет следующий прототип:

```
I = [80 90 100 110 120 130 ];
h = [0.52 0.56 0.62 0.74 0.9 1.12];
axis([80 140 0 1.2]);
hold on
plot(I,h,'ko') =
grid;
t = 0:0.01:140;
y1 = polyfit(I,h,3);
y2 = polyval(y1,t);
plot(t,y2,'k-').
```

## ВЫВОД

Разработанный программный модуль позволяет рассчитать скорость осаждения покрытий по сечению плазменного потока с учетом влияния магнитного поля стабилизирующей катушки, а также скорректировать полученную величину скорости осаждения в зависимости от величины отрицательного ускоряющего потенциала, тока дуги, давления технологического газа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов, В. А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий / В. А. Емельянов, И. А. Иванов, Ж. А. Мрочек. – Минск: Бестпринт, 1998. – 284 с.
2. Мрочек, Ж. А. Газотермические и вакуумно-плазменные покрытия со специальными физико-механическими свойствами / Ж. А. Мрочек, С. А. Иващенко, И. С. Фролов. – Минск: Технопринт, 2001. – 180 с.
3. Кетков, Ю. Л. MATLAB 6.x.: программирование численных методов / Ю. Л. Кетков, А. Ю. Кетков, М. М. Шульц. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 672 с.

Поступила 6.06.2006