

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь*

Физическое осаждение из паров (PVD) используется в высокотехнической промышленности для получения оптических, износ- и коррозионно-стойких покрытий.

Цель статьи — рассмотрение технологических стадий PVD — процессов и основных подходов к их компьютерному моделированию.

Главные технологические особенности технологии представлены ниже /1/. Энергия: Высокая энергия потока необходима для получения высокой адгезии покрытия к основе. Энергия выделяется только в тонком поверхностном слое, и большая часть детали остается относительно холодной (до 500 °С). Поверхностные свойства и структура основы изменяются минимально.

Плазма: PVD технологии используют низкотемпературную плазму. Плазма используется, чтобы уменьшить температуру синтеза химических соединений, добавляя кинетическую энергию к тепловой.

Вакуум: Обработка требует использования вакуумного оборудования, что гарантирует надлежащую чистоту и контроль процесса. Вакуумное оборудование более дорого и сложно в использовании в сравнении с жидкими или воздушными процессами.

Физическое осаждение паров характеризуется созданием металлического пара в форме металлических ионов, электронов и нейтральных частиц исходного материала — титана, циркония, хрома или сплавов типа титан/алюминий, титан/кремний, которые могут реагировать с различными газами типа азота, кислорода, ацетиленом формируя тонкое покрытие.

Ниже кратко рассматриваются основные PVD технологии.

Дуговое испарение. Процесс испарения имеет место в вакуумной атмосфере ($10^{-1} \dots 10^{-4}$ Па) и используется для покрытия главным образом металлических оснований. Вакуумное дуговое испарение характеризуется низким напряжением ($U = 20 \dots 50$ В), высоким током ($I = 50 \dots 300$ А). Анодом являются стенки вакуумной камеры, катод — мишень — сделана из материала покрытия.

Разряд дуги на поверхности катода сконцентрирован в области нескольких микрометров (размер катодных пятен равен $10^{-6} \dots 10^{-4}$ м). Таким образом, материал катода испаряется в миниобъеме с чрезвычайно высокой ско-

ростью, в то время как основная масса катода остается холодной. Вопреки процессам покрытия, где материал покрытия испаряется из жидкого состояния (подобно электронно-лучевому испарению), любая смесь двух или более металлов может испаряться с почти тем же самым составом как у материала мишени.

Ионная металлизация. Метод объединяет возможность получения высокой энергии ионов или атомов с высокой скоростью напыления. В ионной металлизации ионы и атомы материала покрытия произведены испарением и последующей ионизации паров. Ионизация паров дает много преимуществ для создания покрытий для увеличенной твердости и износа. Некоторые из них — улучшенная адгезия покрытия, более плотная микроструктура покрытия.

Магнетронное (катодное) распыление. Катодное распыление — процесс нанесения покрытия, который выполняется в инертной атмосфере (обычно в аргоне) в высоком вакууме приблизительно 10^1 – 10^0 Па под приложенным потенциалом от 500 до 5000 В. В этом процессе ионы аргона распыляют исходный материал мишени. Распыленные металлические атомы мишени осаждаются на основании. Массопередача атомов распылением более управляема в сравнении с тепловыми процессами напыления.

Есть три связанных технологических стадий процесса напыление покрытия — испарение, транспортирование и осаждение.

Испарение — испарение материала катода и формирование плазмы. Это — первая стадия. Параметры стадии — ток дуги, параметры электропитания, давление и тип газа, внешние электрические или магнитные поля.

Транспортирование — перемещение испаренного материала от мишени до основы. Это — вторая стадия. Параметры стадии — состав и давление остаточных газов, внешнее электрическое или магнитное поле.

Осаждение — образование и рост покрытия на основе. Это — третья стадия. Параметры стадии — величина потенциала ускорения, внешнее электрическое или магнитное поля, технологическая наследственность и подготовка поверхности, давление и тип легирующего газа, материал основы, температура основы, положение в камере и геометрическая форма основы, ток дуги, параметры потока.

В целом проблема моделирования может быть представлена как проблема оптимизации с детерминированными параметрами. Решение имеет матрицу вероятных решений:

$$X = (x_{ij}), i = 1 \dots n, j = 1 \dots m,$$

где m — число возможных решений; n — число параметров, делающих решение.

В общем случае эти параметры могут быть функциями времени. Компоненты этой матрицы связаны множеством ограничений, вызванных физическими процессами и принятой технологической схемой реализации первой, второй и, частично, третьей стадий. В общем виде эти ограничения могут быть представлены как условие:

$$Y = y_K (C_K, X) \geq, =, \leq, a_K, K = 1 \dots N,$$

где Y — матрица ограничений; Y_K — некоторая функция; a_K — скалярная величина; C_K — некоторая величина (скаляр или вектор); N — общее число ограничений.

Набор критериев e_1, e_2, \dots, e_q , оценивает правильность выбора решения. Каждый из этих критериев имеет фактор относительной важности $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q$ (вектор важности Λ). Например, из всех целевых параметров стадии три при формировании износостойких покрытий самую большую важность имеют такие параметры как сопротивление износу и микро геометрия поверхности покрытия, в коррозии — структура и пористость покрытия. Каждый из критериев связан с матрицей решений:

$$e_p = e_p (A_p, X), p = 1 \dots q.$$

В большинстве случаев вид этой функции можно давать аналитически, графически, таблично, с помощью логических процедур. Выбранное оптимальное решение из матрицы X должно соответствовать принципу оптимальности вектора критериев E ввиду вектора важности Λ и при выполнении ограничений Y :

$$E = \text{optimum} Y \{E (A, X), \Lambda\}$$

Данная проблема нуждается в аналитической модели процесса для ее решения. Моделирование должно базироваться на результатах экспериментального исследования основных законов формирования физико-химических, технологических и эксплуатационных свойств покрытий с привлечением дисперсионных и статистических методов анализа.

Заключение:

1. Есть три, связанные технологические стадии процесса — напыление, транспортирование и осаждение в PVD-технологиях.

2. Проблема моделирования PVD-процессов представляет многокритериальную проблему оптимизации с определенными параметрами. Моделирование должно описать все PVD-технологические стадии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов В.А. и др. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. — Мн., 1998. — 284 с.