

специальности 1-36 20 04 «Вакуумная и компрессорная техника».

В настоящий момент разработан и утвержден учебный план специальности и образовательный стандарт, начаты работы по разработке учебно-плановых документов.

Свое дальнейшее развитие кафедра видит в расширении и углублении связи с профильными промышленными предприятиями, совершенствовании дипломного проектирования, увеличении числа тематик дипломных проектов, приближение тематик к реальным потребностям промышленных предприятий. Переход на 4,5 года обучения остро ставит вопрос об открытии на кафедре подготовки по второй ступени высшего образования (практико-ориентированная магистратура). В выборе содержательной части подготовки магистров несомненно должно играть решающее мнение наших предприятий-заказчиков. Кафедра готова стать базой подготовки специалистов под потребности конкретных предприятий и надеется на заинтересованность и помощь в этом направлении со стороны последних. Статус кафедры как выпускающей ставит задачу интенсификации научно-исследовательской работы, усиление работы по подготовке кадров высшей квалификации, более широкому вовлечению в научно-инновационную деятельность студентов, расширение сети филиалов кафедры и ее международного сотрудничества.

УДК 621.7

Иванов И.А., Мисник И.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДАЕМЫХ ИЗ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

БНТУ, Минск

Нанесение вакуумно-плазменных покрытий является важной технологической составляющей получения готового изделия с требуемыми эксплуатационными свойствами. Покрытия, сформированные способом вакуумно-плазменного осаждения,

используются в настоящее время как износостойкие, электропроводящие, антикоррозионные и защитно-декоративные. Для получения покрытий применяются источники плазмы, создающие направленные потоки, как паров, так и ионизированных частиц материала покрытия.

Основной задачей на этапе осаждения потока частиц является получение конденсатов заданного состава, с предъявлением требований к качеству осажденного слоя. Если состав покрытия будет задаваться материалом мишени, а также присутствующим в объеме вакуумной камеры технологическим газом, то качество сформированного покрытия будет определяться составом плазменного потока, особенностями его транспортировки через вакуумную камеру и взаимодействия с поверхностью изделия. В связи с этим необходима теоретическая модель, описывающая процесс транспортировки плазмы к поверхности конденсации.

Цель данной статьи – это дать представление о научной работе, проводимой на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» в области моделирования процессов массопереноса и формирования структуры покрытий в вакуумно-плазменных технологиях.

Конденсация атомов пара или потока ионизированных частиц в вакууме включает четыре механизма взаимодействия частиц с поверхностью: захват атомов, то есть адсорбция атомов на поверхности; диффузия атомов вдоль поверхности покрытия до их поглощения на участках поверхности с низкой энергией кристаллической решетки; объемная диффузия атомов и десорбция части конденсирующихся частиц. Преобладание того или иного механизма определяется как энергией конденсирующихся частиц, так и температурой поверхности конденсации.

Для вакуумных покрытий, формируемых в условиях близких к равновесным, справедливы зонные модели Мовчана-Демчишина-Торнтонна, что подтверждается результатами многочисленных экспериментов. Согласно данным структурным моделям микроструктура вакуумных покрытий может

быть разделена на четыре зоны по величине отношения температуры поверхности конденсации T_s к температуре плавления осаждаемого материала T_m : зона 1 ($T_s/T_m < 0,3$), зона 2 ($0,3 < T_s/T_m < 0,5$), зона 3 ($T/T_m > 0,5$) и, выделенная Торнтоном между зонами 1 и 2, переходная зона T .

Однако наличие технологического газа показывает возможность получения новых структур вакуумных покрытий, осаждаемых из ионизированных потоков вещества, без изменения температуры поверхности конденсации.

Сопоставление результатов экспериментальных исследований состава и структуры позволяет сделать предположение, что основной причиной образования «послойной» структуры является растворенный азот и относительно низкая энергия ионов конденсирующейся плазмы, при которых отсутствуют условия образования химических соединений на основе азота. Полнота протекания реакции образования в покрытии нитридов металлов определяется количеством адсорбированного на поверхности основы атомов (молекул) технологического газа, которое зависит от его давления в технологическом объеме вакуумной камеры.

На основе анализа уравнения поверхностного натяжения Гиббса показано, что растворенная химически активная примесь (азот) на поверхности фронта кристаллизации зерен покрытия изменяет силу поверхностного натяжения на границе роста кристаллов. При условии постоянства температуры поверхности и давления уменьшение силы поверхностного натяжения равно: $\gamma_s = \gamma_{s0} - \ln C \cdot n^k$. Таким образом, рост примеси на поверхности растущих зерен покрытия является наиболее вероятной причиной образования «послойной» структуры.

Для выявления механизмов влияния технологического газа на рост покрытий и формирование их структуры необходима разработка математической модели численного моделирования процессов нанесения вакуумных покрытий с учетом парных

взаимодействий частиц рабочего вещества с молекулами технологического газа в рабочем объеме вакуумной камеры.

В качестве моделируемого метода получения направленных потоков ионизированной металлической плазмы был выбран электродуговой (холловский) испаритель с интегрально холодным расходуемым катодом-мишенью. В данных системах поток плазмы металла генерируется в результате электродуговой эрозии водоохлаждаемого катода в хаотически перемещающихся по его торцовой поверхности катодных пятнах. Для вытяжки катодных пятен на торцовую поверхность, а также стабилизации горения дуги вакуумного электродугового разряда в конструкции испарительных устройств предусмотрена система электромагнитных катушек.

Для управления потоком проектируется дополнительная система катушек. Анализ движения ионов плазменного потока, движущихся в магнитном поле, показывает, что траектории их движения соответствуют прямым линиям. При рабочем давлении в вакуумной камере порядка $10^{-4} \dots 10^{-3}$ Па концентрация молекул технологического газа $n = 10^{17} \text{ м}^{-3}$, плотность ионов плазменного потока – 10^{18} м^{-3} , что позволяет судить о бесстолкновительном движении ионов. Следовательно, для описания транспортировки плазменного потока можно использовать методы, описывающие течение газов в свободномолекулярном режиме. Наиболее перспективен среди теоретических методов расчета движения молекулярных течений метод статистических вычислений [2].

В связи с тем, что процесс испарения идет в условиях быстро перемещающихся катодных пятен, можно считать, что на поверхности катода мишени все параметры усредняются. Исходной точкой траектории движения иона будет поверхность катода-мишени, координата которой будет определяться радиусом $r = R_0 \sqrt{\xi}$ и углом $\varphi = 2\pi\xi$ где ξ – случайное число в интервале $[0,1]$, R_0 – радиус катода. Направление вектора скорости иона

будет определяться углом $\psi = 2\pi\xi$ и телесным углом $\theta = \arcsin \sqrt{\xi}$. Расстояние, пройденное ионом до столкновения, будет определяться длиной свободного пробега: $\lambda = \lambda_0 \ln(1 - \xi)$, где λ_0 – средняя длина свободного пробега.

В точке столкновения ион может менять направление вектора скорости. Новое направление вектора будет определяться двумя углами $\Phi = 2\pi\xi$ и $\Psi = 2\pi\xi$.

После столкновения частицы процесс повторяется. Моделирование производится до момента попадания частицы (иона) на поверхность изделия, либо до момента пересечения частицей (ионом) геометрических границ вакуумной камеры. Далее расчет повторяется для следующей частицы. Результаты расчета позволяют получить осредненные параметры потока на поверхности конденсации, которые учитывают стохастический характер процессов, протекающих в объеме вакуумной камеры.

В результате парных столкновений ионов плазменного потока с атомами и молекулами технологического или остаточного газа при их транспортировке от источника к поверхности конденсации происходит потеря части кинетической энергии направленного движения. Передача кинетической энергии от быстрых ионов к медленным нейтральным атомам может происходить в условиях упругих и неупругих столкновений.

При упругих взаимодействиях величина энергии, теряемой заряженной частицей в момент ее соударения, будет равна энергии, приобретаемой атомом: $E = \mu \bar{W} \sin^2(\chi/2)$, где $\mu = 4m_1m_2 / (m_1 + m_2)^2$ – приведенная масса; \bar{W} – средняя энергия налетающей частицы перед взаимодействием; χ – угол рассеивания (между конечным направлением движения частицы и начальным).

В процессы неупругих взаимодействий главный вклад вносит процесс перезарядки ($A^+ + B^0 = A^0 + B^+$); если при перезарядке

внутренняя энергия системы взаимодействующих частиц не меняется, то перезарядка называется резонансной, что характерно для взаимодействия иона и атома одного вещества [3]. Данный процесс применительно к технологии ионно-плазменного напыления играет положительную роль, так как в плазменном потоке исчезают медленные нейтральные атомы.

Разработанный численный алгоритм расчета переноса ионов плазменного потока от источника к поверхности конденсации на основе метода пробной частицы с учетом парных столкновений ионов потока с частицами технологического газа позволяет рассчитать изменение плотности потока у поверхности конденсации с учетом геометрических размеров, как изделия, так и испарителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мрочек, Ж.А. Плазменно-вакуумные покрытия: монография / Ж.А. Мрочек [и др.]. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 369 с.

2. Иванов, И.А. Анализ математических подходов к описанию движения сильно разряженных газов / И.А. Иванов // Мат. международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», Севастополь, 2009. – ДонНТУ, 2009. – Том 1. – С. 276-279.

3. Мотт, Н. Теория атомных столкновений / Н. Мотт, Г. Месси. – пер. с англ., [3 изд.]. – М.: Мир, 1969.

УДК 621.793

Иващенко С.А., Койда С.Г.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОТВЁРДОСТИ ПОКРЫТИЯ

БНТУ, Минск

Износостойкость любого материала зависит от способности его поверхностного слоя сопротивляться пластическому