

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

деформированию, приводящему к схватыванию и разрушению контактирующих поверхностей [1]. Поэтому одним из основных требований к износостойким материалам является высокая твердость поверхности. Применительно к тонкопленочным вакуумно-плазменным покрытиям такой характеристикой является микротвердость покрытия. Как отмечается в работе [2], поверхностная микротвердость вакуумных конденсатов, получаемых методом КИБ, определяется составом и структурным состоянием покрытия и зависит от режимов его осаждения.

Исследования проводились на образцах алюминиевого сплава Д16Т с размерами 25×10×5 мм. Нанесение покрытий TiN производилось с использованием вакуумной установки УРМЗ.279.048, оснащенной дополнительно импульсным генератором углеродной плазмы. Параметры осаждения покрытия варьировались в следующих пределах: ток дугового разряда  $I=80\text{...}130$  А; напряжение на подложке  $U_n=0\text{...}200$  В; давление реакционного газа (азота)  $P=(2\text{...}14)\times 10^{-2}$  Па. Толщина покрытий составляла 3...5 мкм.

Микротвердость покрытий измерялась с использованием прибора ПМТ-3 при нагрузке на алмазную пирамиду 0,5 Н с соблюдением требований ГОСТ 9450–76. Толщина покрытий определялась методом профилографирования (ГОСТ 9.302-88). Структура и фазовый состав покрытия исследовались рентгеновским дифрактометром в  $\text{Co-K}\alpha$  излучении, а также с использованием электронного микроскопа УЭМВ-100В.

Экспериментальные зависимости микротвердости покрытия TiN от технологических параметров процесса осаждения представлены на рисунке 1.

Наибольшее влияние на микротвердость поверхности, упрочненной нитридом титана, оказывает давление реакционного газа в рабочей камере установки.

Повышение до максимума значений микротвердости конденсатов в области давлений  $(2\text{...}6)\times 10^{-2}$  Па является следствием образования твердого раствора азота в кристаллической

решетке осаждаемого металла (титана), фазового упрочнения за счет выпадения второй фазы (нитрид) и образования твердых растворов на основе решетки нитридов. Кроме того, в этом диапазоне наблюдается значительное уменьшение содержания капельной фазы в продуктах эрозии материала катода, которая имеет микротвердость порядка 2000 МПа. Однако покрытия, полученные при давлении  $(5...6) \times 10^{-2}$  Па, наряду с высокой микротвердостью характеризуются малой пластичностью и поэтому склонны к хрупкому разрушению в процессе трения [2]. Уменьшение значений микротвердости покрытия при дальнейшем повышении давления азота может быть следствием двух причин: образования более однородного по структурным характеристикам конденсата стехиометрического состава (TiN) и уменьшения искажений кристаллической решетки образующихся нитридов вследствие падения скорости конденсации. Уменьшение скорости конденсации в области давлений азота выше  $6 \times 10^{-2}$  Па обусловлено процессами взаимодействия частиц плазмы в объеме, а также уменьшением энергии ионов титана на газовой мишени.

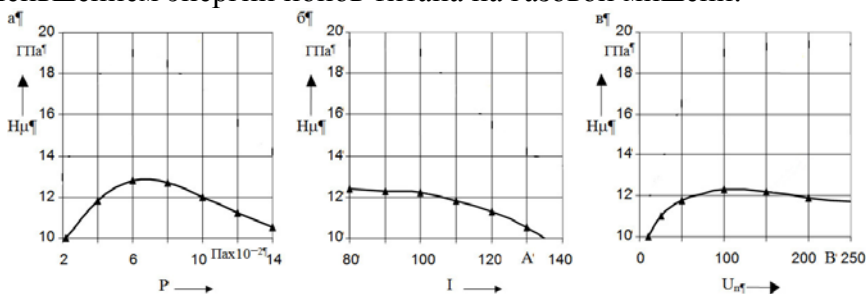


Рисунок 1 – Зависимость микротвердости покрытия TiN от давления реакционного газа при  $I=100$ А и  $U_{п}=100$ В (а); тока дуги при  $P=8 \times 10^2$  Па и  $U_{п}=100$ В (б); напряжения на подложке при  $P=8 \times 10^2$  Па и  $I=100$ А (в)

Существенное влияние на микротвердость покрытия оказывает также величина тока дугового разряда. В диапазоне 80...100 А микротвердость покрытия TiN изменяется незначительно.

Дальнейшее повышение тока дугового разряда приводит к существенному снижению микротвердости покрытия. Это обусловлено тем, что увеличение тока дуги, особенно в диапазоне 100...140 А, приводит к резкому увеличению количества и размеров капель титана (материал катода) в плазменном потоке [3]. Кроме того, при больших значениях тока (120...140 А) на поверхности конденсации наряду с каплями появляются макроблоки размерами в десятки микрометров, осажденные, по-видимому, в твердом состоянии. Так как капельная фаза, как указывалось выше, имеет значительно меньшую микротвердость в сравнении с нитридом титана, то микротвердость покрытия TiN в целом снижается.

С увеличением потенциала от 0 до 100 В микротвердость покрытия увеличивается. Это связано с тем, что при малых значениях потенциала энергии ионов титана и связанной с ней температуры подложки недостаточно для эффективного протекания плазмохимической реакции металлической плазмы с реактивным газом на поверхности конденсации. В результате при нормальном давлении азота конденсат практически полностью состоит из  $\alpha$ -Ti, а покрытие имеет серый или серо-желтый цвет. В то же время в рабочем диапазоне (100...200 В), используемом на практике, величина напряжения на микротвердость покрытия практически не влияет, а покрытие имеет насыщенный желтый цвет. На микротвердость поверхностного слоя с упрочняющим покрытием TiN оказывает также влияние толщина покрытия. С увеличением толщины покрытия микротвердость поверхности возрастает, что объясняется уменьшением влияния мягкой основы. При достижении толщин покрытия порядка 6...7 мкм рост микротвердости поверхностного слоя образцов практически прекращается, что свидетельствует, очевидно, о достижении истинного значения микротвердости покрытия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – Киев: Техника, 1970. – 395 с.

2. Моляр, А.Г. Влияние режима нанесения покрытия нитрида титана на процесс его изнашивания при фреттинг-коррозии / А.Г. Моляр, А.И. Васильев // Трение и износ. – 1992. – Т. 13. – № 2. – С. 350-355.

3. Карпенко, Г.Д. Исследование структуры покрытий на основе нитрида титана / Г.Д. Карпенко, В.А. Лойко // Известия АН БССР. Сер. физ. -техн. наук. – 1986. – № 1. – С. 31-34.

УДК 373

Кулак Ч.В.

## **ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СМОРГОНСКОГО ЗАВОДА ОПТИЧЕСКОГО СТАНКОСТРОЕНИЯ**

*ОАО СЗОС, Сморгонь*

Сморгонский завод оптического станкостроения был основан в апреле 1972 года как приборостроительный. В трудных условиях осваивались производственные мощности. Первая продукция была выпущена в корпусах, где не было отопления, питьевой воды, вентиляции.

В марте 1975 года началось освоение и выпуск станков для обработки оптических деталей. В мае были собраны первые 10 станков 6ШП-100М. Всего за год было выпущено 220 станков трех моделей. В 1976 году завершилось строительство первой очереди завода.

Значительными были достижения в области разработки современного оборудования и создания нового технологического процесса нанесения тонкопленочных покрытий методом ионно-лучевой обработки. Так в 1977 году была выпущена первая партия вакуумных установок. Освоен выпуск вакуумных установок для обработки оптических деталей модели ВУ-1А позже вакуумная установка модели ВУ-2М. Также параллельно велись работы по освоению вакуумного ионно-плазменного оборудования – это вакуумные установки модели ВУ-1Б ВУ-2МБС. В 1990 году завод становится участником