

- им. П.О. Сухого» №4. – Гомель. – 2009, с. 40-52.
- Кузнецов В.П., Дмитриева О.В. Моделирование и исследование формирования плосковершинного микрорельефа поверхностей трения со смазочными микрокарманами при многоцелевой обработке деталей. «Известия Томского политехнического университета» №2. – Томск. – 2011.
 - Морозенко Б.Н., Проволоцкий А.Е., Андреев Б.И., Пасько Л.П. Определение маслостойкости поверхностей трения. «Вестник машиностроения», 1974, №2, с.48-49.
 - Радионенко А.В. Способ определения маслостойкости поверхности трения. Патент SU 985549. Оpubл. 30.12.1982.
 - Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик // М.: Наука. – 1972. – 702с.
 - Theisen W, Schuermann A. Electro discharge machining of nickel-titanium shape memory alloys. Mater Sci Eng A. 2004;378:200–204.
 - Chen SL, Yan BH, Huang FY. Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V. J Mater Process Technol. 1999;15:107–111.
 - Wang ZL, Lee HG, Aspinwall DK, Dewes RC, Aspinwall EM. Workpiece surface modification using electrical discharge machining. Int J Mach Tools Manuf. 2003;43:121–128.
 - Wang ZL, Fang Y, Wu PN, Zhao WS, Cheng K. Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode. J Mater Process Technol. 2002;129:139–142.
 - Lin YC, Yan BH, Chang YS. Machining characteristics of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using a combination process of EDM with USM. J Mater Process Technol. 2000;104:171–177.

УДК 533.9.08; 539.216

УПРАВЛЯЕМОЕ РЕАКТИВНОЕ МАГНЕТРОННОЕ НАНЕСЕНИЕ TiAlN ПОКРЫТИЙ

Климович И.М., Бурмаков А.П., Зайков В.А., Кулешов В.Н., Романов И.А.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Введение

Основной проблемой реактивного магнетронного распыления является неустойчивость параметров разряда в «переходных» режимах горения. В таких режимах часть поверхности катода магнетрона покрыта соединением металла и реактивного газа, а часть поверхности остается металлической. Переходные режимы представляют значительный интерес для получения покрытий с заданной стехиометрией состава и получения высокой скорости их роста [1]. Для поддержания процесса распыления в «переходном» режиме необходимо обеспечить обратную связь между параметрами плазмы магнетронного разряда и расходом реактивного газа путем управления расходом реактивного газа в реальном времени. Такое управление может базироваться на оптической эмиссионной спектроскопии [2]. Алгоритмы оптического управления сводятся к выводу магнетронного разряда на требуемый химический состав плазмы и его поддержанию путем управления расходом реактивного газа по сигналам, получаемым из оптического излучения плазмы разряда.

Алгоритмы оптического управления можно условно разделить на одно- и двухканальные по числу контрольных элементов спектра из обла-

сти катода магнетронного распылителя. Одноканальный алгоритм сводится к поддержанию на заданном уровне интенсивности одного контрольного элемента спектра, используя обратную связь с расходом реактивного газа. В качестве контрольного элемента может быть взята как спектральная линия материала катода (алгоритм 1), так и молекулярная полоса реактивного газа (алгоритм 2). Двухканальный алгоритм сводится к одновременной регистрации интенсивности двух контрольных элементов. В качестве контрольных элементов можно использовать спектральные элементы материала катода и реактивного газа. Управляющий расходом реактивного газа сигнал формируется таким образом, что отношение интенсивностей элемента реактивного газа к элементу материала катода (алгоритм 3) поддерживается на заданном постоянном уровне. Рассмотрим представленные алгоритмы на примере нанесения TiN и TiAlN покрытий.

На рис. 1 представлены результаты исследования влияния низкочастотной нестабильности мощности магнетронного разряда на состав осаждаемого потока для различных алгоритмов оптического управления расходом азота. Кривые нормированы к единице для плотности мощности $33,5 \text{ Вт/см}^2$, соответствующей покрытию

стехиометрического состава. Видно, что при использовании одноканальных алгоритмов управления колебания мощности разряда приводят к существенному изменению состава осаждаемого потока (кривые 1, 2). Влияние колебаний мощности на состав газовой среды минимально при использовании алгоритма 3 (кривая 5).

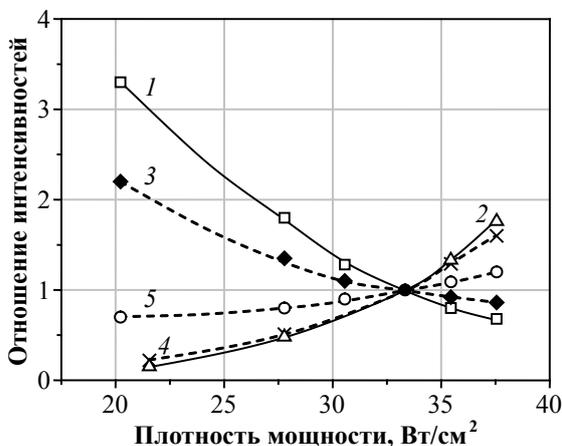


Рисунок 1 - Зависимость отношения интенсивностей линий I_{N2}/I_{Ti} (1, 2); I_{N2}/I_{Ar} (3-5) от плотности мощности магнетронного разряда при давлении 0,42 Па для процессов осаждения нитрида титана с использованием алгоритмов управления расходом азота: 1 и 3 - $I_{N2\ 357,7} = const$, 2 и 4 - $I_{Ti\ 365,4} = const$, 5 - $I_{N2\ 357,7}/I_{Ti\ 365,4} = const$

Рассмотрим результаты практической реализации метода оптического управления реактивным магнетронным распылением на примере формирования наноструктурированных TiAlN покрытий с улучшенными структурными и механическими свойствами.

Нанесение TiAlN покрытий проводили на модернизированной установке УВН-2М, оснащенной магнетронным распылителем, ионным источником типа «Радикал», системой нагрева подложек, системой подачи смещения на подложку и системой контроля расхода газов. Контролировались следующие параметры разряда: ток, напряжение, суммарное давление смеси аргон-реактивный газ, температура подложки, напряжение и ток смещения на подложку.

Процесс распыления проводили с использованием мозаичной мишени на основе Ti (110 мм) с цилиндрическими Al вставками (10 мм), расположенными по среднему диаметру зоны эрозии (67 мм). Расстояние мишень-подложка выбиралось равным 80 мм. Мощность разряда поддерживалась постоянной и задавалась в диапазоне от 400 до 600 Вт.

Управление процессом напуска реактивного газа проводили по одноканальному алгоритму. Напуск азота контролировался по интенсивности спектральной линии титана Ti I 506,5 нм,

величина которой поддерживалась постоянной и связана со степенью реактивности α [2]:

$$\alpha = \frac{I_0 - I}{I_0 - I^*},$$

где I_0 – интенсивность атомной линии металла мишени ($\lambda = 506,5$ нм); I – текущая величина интенсивности линии титана при осаждении; I^* – интенсивность линии металла для полностью азотированной мишени.

Режимы реактивного магнетронного распыления: давление $P = 7,0 \cdot 10^{-2}$ Па; напряжение на источнике питания $U = 300-320$ В; ток разряда $I = 1,3-1,75$ А; температура подложки $T = 220$ °С; потенциал смещения $U_{см}$ на подложке задавался равным -90 В; степень реактивности α задавалась равной 0,55, 0,60 и 0,65 (чем больше значение α , тем больше напуск азота во время осаждения покрытий). Время нанесения выбиралось в соответствии с предъявляемыми требованиями к толщине покрытия. В некоторых случаях требовалось нанесение подслоя TiAl для улучшения адгезионных качеств покрытия.

Для исследования элементного состава сформированных покрытий TiAlN на кремниевых подложках (толщина ~0,5 мкм) применялся метод энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (спектры регистрировались датчиком рентгеновского излучения компании Princeton Gamma-Tech, Inc). Микротвердость системы покрытие-подложка измерялась на твердомедре ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н (в качестве подложек использовался твердосплавный материал ВК-20, толщина исследуемых покрытий составляла ~1,5 мкм).

В табл. 1 представлены количественные соотношения элементов и результаты измерения твердости H в покрытиях TiAlN, полученных в режимах нанесения с различным соотношением напуска инертного и реактивного газов в камеру в процессе осаждения (различными степенями реактивности).

Табл. 1. Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и твердости исследуемых TiAlN покрытий

α	Элементное содержание, ат.%			H , ГПа
	Ti	Al	N	
0,55	38,00	25,23	36,77	18,39
0,60	38,17	24,85	36,98	24,86
0,65	34,66	23,10	42,24	20,30

Присутствие кислорода, негативно влияющего на механические свойства покрытий, методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии не обнаружено. Также, из табл. 1 видно, что при увеличении степени реактивности

(т.е. увеличении напуска азота в вакуумную камеру в процессе осаждения) количество азота в сформированном покрытии растёт.

Результаты измерения твердости показали, что H существенно зависит от степени реактивности и наибольшее значение H имеет покрытие, сформированное при степени реактивности $\alpha = 0,60$.

Выводы

Результаты исследования показали, что метод контролируемого реактивного магнетронного распыления позволяет получать качественные бескислородные наноструктурированные TiAlN покрытия с высоким значением твердости.

Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии установлено, что элементный состав покрытий, формируемых с использованием одноканального алгоритма управления процессом реактивного магнетронного распы-

ления, определяется заданным с помощью прибора управления значением степени реактивности.

1. Spencer, A.G. Pressure stability in reactive magnetron sputtering / A.G. Spencer, R.P. Howson, R.W. Lewin // Thin Solid Films. – 1988. – Vol. 158. – P. 141–149.
2. Бурмаков, А.П. Спектроскопическая система контроля расхода газов и содержания примесей в процессе магнетронного осаждения пленок / А.П. Бурмаков, В.Н. Кулешов // ЖПС. – 2007. – Т. 74, № 3. – С. 412 – 416.
3. Комаров, Ф.Ф. Контролируемое нанесение Ti-Al-N покрытий методом реактивного магнетронного распыления / Ф.Ф. Комаров [и др.] // Доклады НАН Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 5. – С. 40–43.

УДК 535.015, 535.422

МЕТОДЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Кожевников Д.А., Фёдорцев Р.В., Старосотников Н.О.

*Белорусский национальный технический университет,
Минск, Республика Беларусь*

Дисторсия является основной аберрацией, которая влияет на качество изображения при работе фотографических систем, предназначенных для дистанционного зондирования Земли. В связи со значительными ошибками (такими как: бочкообразная и подушкообразная геометрия изображения), возникающими в оптических системах (ОС) при данной аберрации, исправление объективов на дисторсию является важной задачей в современном оптическом приборостроении. Геометрическая калибровка съёмочных аэрофотографических оптических систем предусматривает определение фотограмметрических параметров, подвергаемых калибровке оптико-электронных приборов (ОЭП). Знание указанных параметров необходимо для осуществления географической координатной привязки получаемых изображений к рельефу обрабатываемого участка, а также приведения их к общему масштабу и совмещению изображений.

При определении величины дисторсии часто определяют суммарные её расчётные значения и погрешности, связанные с различными способами изготовления и сборки деталей объектива, погрешностями установки объектива при контроле дисторсии, погрешностями измерений и т. п.

Общей схемой геометрической калибровки ОЭП (рисунок 1) является проецирование на фотоприёмник (ФП) векторов с известной пространственной ориентацией. По их изображениям на ФП, ФП регистрирует их

пространственное положение в системе координат ОЭП. Таким образом в данной схеме периодическая структура ФП ОЭА будет являться измерительной шкалой. Невязки спроецированных векторов и их изображений будут определять дисторсию ОЭП.

Главным различием методов геометрической калибровки можно назвать способ формирования векторов с известной пространственной ориентацией.

Известны способы калибровки аэрофотографической системы на основе **снимков звёзд**. Преимущества этого метода заключается в простоте реализации, в отсутствии необходимости использования дополнительного оборудования, кроме точных часов. Основным недостатком данного метода является то, обстоятельство что условия калибровки отличаются от реальной съёмки [2], а также зависимость от метеорологической обстановки. Более эффективным является метод калибровки оптической системы по снимкам специального тестового объекта или полигона. Принцип геометрической калибровки может основываться на обработке получаемых оптической системой изображений тестовых элементов с изначально известными с высокой точностью координатами [3]. Главным различием методов геометрической калибровки можно назвать способ формирования опорных направлений, которые предъявляются оптической системе в процессе калибровки.