

11, ноябрь 2015

УДК 621.793

Исследование магнетронного метода нанесения алмазоподобного покрытия на газодинамическую опору динамически настраиваемого гироскопа

*Агисенов Ю.М., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии приборостроения»*

*Научный руководитель: Холевин В.В., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии приборостроения»
k_rl6@bmstu.ru*

Введение

Развитие систем автоматического управления подвижными объектами и навигационных систем летательных аппаратов требует применения малогабаритных прецизионных гироскопов относительно невысокой стоимости. Эти требования привели в своё время к поиску новых конструктивных решений в области проектирования giroприборов и созданию лазерных, волоконно-оптических, вибрационных, электростатических и других типов гироскопов.

Наибольшее применение в последнее время находят роторные вибрационные трёхстепенные гироскопы с внутренним упругим вращающимся кардановым подвесом – динамически настраиваемые гироскопы.

Неотъемлемой частью современных динамически настраиваемых гироскопов является газодинамическая опора (ГДО), введение которой в конструкцию существенно повысило ресурс и точность прибора. ГДО состоит из неподвижной части (втулки) и подвижной (полусферы). Для решения проблемы с возникающим моментом сухого трения на рабочие поверхности ГДО напыляют износостойкие покрытия TiN и DLC. На современных производствах такое напыление осуществляется методом конденсации и ионной бомбардировки (КИБ) однако с усовершенствованием приборов и их миниатюризацией такой метод становится не актуальным. Для решения данной проблемы из множества существующих методом сравнительного анализа был выбран метод

магнетронного напыления, а также наиболее удобная для применения магнетронно-распылительная система.

В данной работе рассматривается напыление износостойких покрытий на деталь газодинамической опоры типа «полусфера».

Принцип действия МРС

Среди методов ионно-плазменного нанесения тонкопленочных покрытий все чаще используют магнетронную распылительную систему (МРС). Высокая скорость нанесения в ней достигается увеличением плотности ионного тока путем локализации плазмы у поверхности мишени из распыляемого материала с помощью сильного поперечного магнитного поля. Упрощенная конструкция МРС представлена на рис. 1.

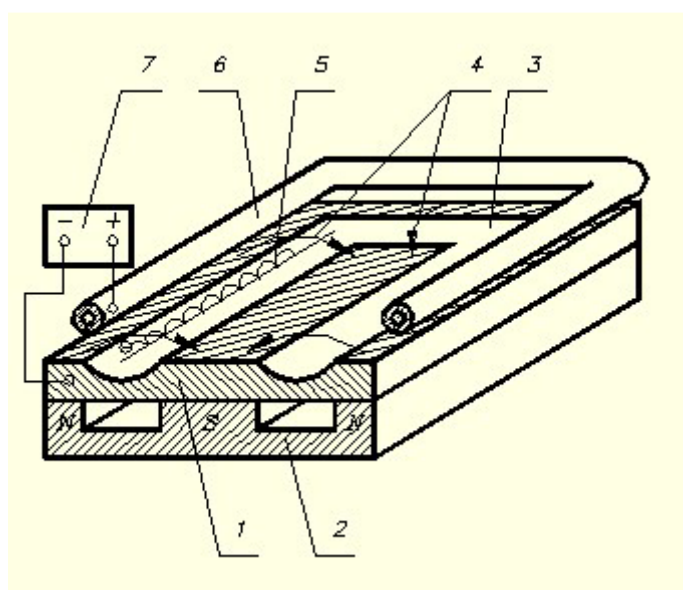


Рис. 1. Упрощенная конструкция МРС:

- 1-катод-мишень; 2 - магнитная система; 3 - распыляемая поверхность мишени;
4 - вход и выход линий магнитного поля; 5 - траектория движения электрона;
6 - анод; 7 - питание

Основными элементами МРС являются: катод-мишень 1, анод 6 и полюса магнитной системы 2. Поверхность мишени 1, расположенная между местами входа и выхода силовых линий 4 магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки 3, геометрия которой зависит от формы полюсов.

Эмиттированный с катода под действием ионной бомбардировки электрон захватывается магнитным полем и совершает сложное циклоидальное движение по замкнутой траектории 5 вдоль поверхности мишени. Он оказывается, как бы в ловушке,

создаваемой с одной стороны магнитным полем, стремящимся вернуть его на катод, а с другой стороны поверхностью мишени, стремящейся оттолкнуть его. Электрон циркулирует в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон теряет приобретенную энергию. Большая часть энергии электрона, прежде чем он попадает на анод, используется на ионизацию, что значительно увеличивает эффективность этого процесса и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени 1.

Высокая интенсивность ионной бомбардировки мишени приводит к резкому возрастанию скорости распыления и осаждения покрытия на поверхность детали. Так, в МРС с плоской дисковой мишенью при мощности источника питания 4 кВт средняя скорость осаждения находится в пределах (7...45) нм/с, что в (5..10) раз больше, чем в диодной системе и в (12...15) раз больше, чем при термическом испарении.

Все параметры процесса условно разделим на две группы: эмиссионные и геометрические. Эмиссионными параметрами будем считать давление рабочего газа, температуру нагрева детали, мощность магнетронного распылителя, вольтамперные характеристики разряда и т.д., а геометрическими - линейные и угловые величины, характеризующие пространственное положение детали относительно распылителей в каждый момент времени.

Одним из методов прогнозирования достижимого качества покрытия является моделирование процесса напыления. Такие свойства покрытия как толщина и неравномерность толщины могут быть выражены через геометрические параметры. В этом случае математическое моделирование можно ограничить геометрической интерпретацией процесса, что обеспечивает достоверность результатов моделирования на (75...90) % и погрешность расчета этих двух показателей качества не более (1...3) %.

Геометрический подход не учитывает возможных изменений эмиссионных параметров, но позволяет рассмотреть нанесение покрытия на любую поверхность детали: цилиндрическую, сферическую, асферическую и т.д.

Схема нанесения покрытия (в дальнейшем схема напыления) на полусферическую деталь представлена на рис. 2.

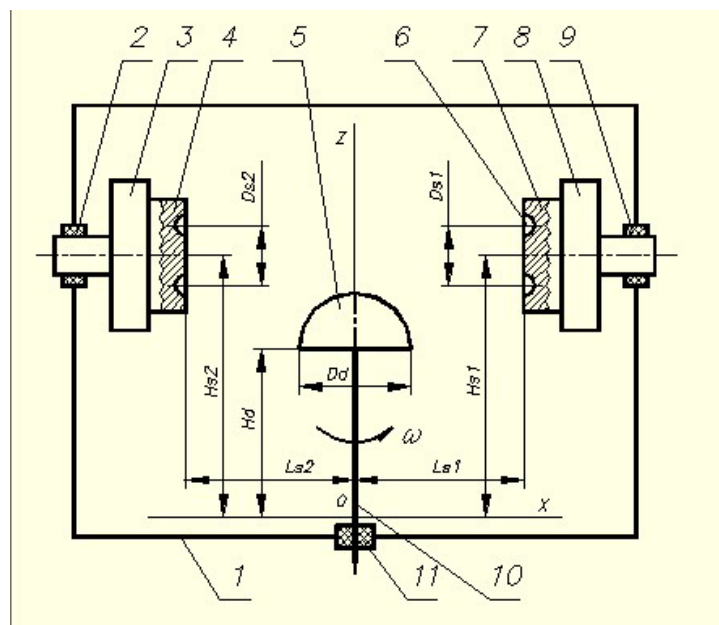


Рис. 2. Схема нанесения покрытия в МРС

Магнетронные распылители 3 и 8 (в дальнейшем распылители 3 и 8) с мишенями 4, 7 в виде плоского диска установлены в вакуумной камере 1. Зона эрозии материала мишени (зона распыления), например, распылителя 8 представляет собой узкую кольцеобразную область 6. Вакуумные уплотнения 2 и 9 позволяют перемещать распылители вдоль оси симметрии. Покрытие наносят на внешнюю поверхность полусферической детали 5, вращаемой с угловой скоростью механизмом привода 10 относительно ее оси симметрии, совпадающей с осью Z. Механизм привода 10 устанавливают в вакуумной камере 5 через вакуумное уплотнение 11, что обеспечивает возможность перемещения детали 5 вдоль оси Z. Для повышения производительности процесса и обеспечения равномерности толщины покрытия в вакуумной камере 1 может располагаться и более двух распылителей. Установлено, что из геометрических параметров на неравномерность толщины покрытия наибольшее влияние оказывают представленные на рис.2 линейные размеры:

Dd - диаметр детали;

Hd - высота детали;

$DS1$, $DS2$ - диаметры средней линии кольцеобразной зоны распыления мишеней распылителей 1 и 2 соответственно;

$LS1$, $LS2$ - расстояния между осью Z и плоскостью мишеней распылителей 1 и 2;

HS1, HS2 - высоты мишеней распылителей 1 и 2.

Для полусферической детали неравномерность толщины δh удобно оценивать в долготном (по параллелям) и широтном (по меридианам) направлениях, поэтому координаты точки на поверхности детали достаточно определять двумя полярными углами β (B), γ (G).

Порядок отсчета этих углов показан на рис. 3.

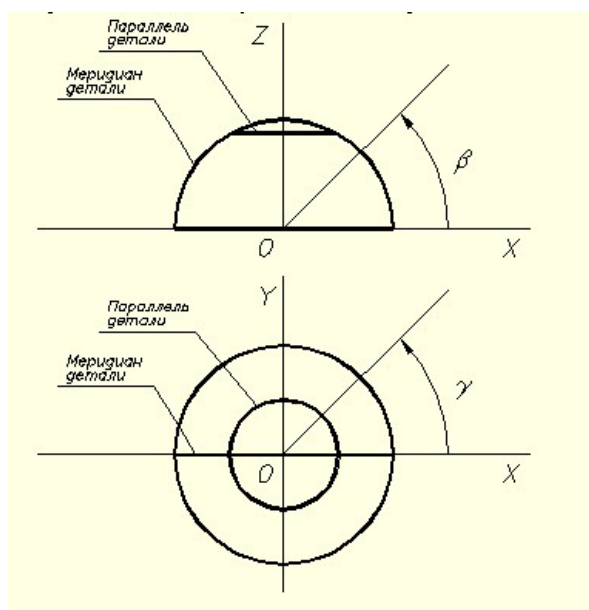


Рис. 3. Система координат детали

Геометрическая модель нанесения покрытия в МРС.

При расчете толщины покрытия обычно используют следующие допущения:

- распределение распыленных атомов в пространстве подчиняется закону косинуса;
- атомы распыляемого материала незначительно рассеиваются в результате столкновений с атомами рабочего газа;
- распыленный атом осаждается в месте соударения с деталью.

В общем случае толщина покрытия h в заданной точке на поверхности детали может быть рассчитана по следующей формуле:

В общем случае толщина пленки в произвольной точке подложки описывается выражением:

$$h = \frac{v}{\pi \Gamma^2} \cos \varphi \cos \psi t, \quad (1)$$

где V - скорость распыления по толщине;

φ - угол между нормалью к поверхности распыления и направлением распыления;

ψ - угол между нормалью к поверхности подложки и направлением осаждения;

r - расстояние от элемента распыления до точки осаждения;

t - время распыления.

Основные элементы геометрической модели, использованные в формуле (1), показаны на рис. 4. Под точкой распыления 1 понимается элементарный участок узкой кольцеобразной зоны распыления 2, лежащей в плоскости мишени 3, а под точкой конденсации 4 элементарный участок поверхности напыляемой детали 5. Угол распыления φ измеряется между нормалью к плоскости мишени в точке распыления и вектором r , а угол конденсации между нормалью к поверхности детали в точке конденсации и вектором r . Погрешность толщины покрытия можно оценить относительной неравномерностью (далее просто неравномерностью):

$$h = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{h_{\max}} 100\% ,$$

где $h_{\max}$ и $h_{\min}$ соответственно максимальная и минимальная толщина пленки в рассматриваемых точках поверхности детали.

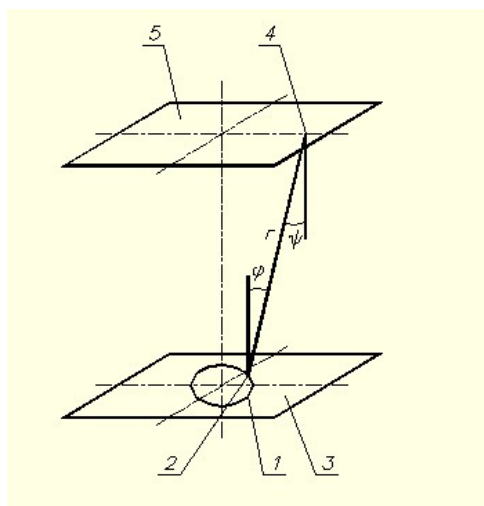


Рис. 4. Основные элементы геометрической модели

Расчет

Расчет неравномерности покрытия проводится по меридиану детали. Угол, изменяющийся в диапазоне от 0 до 360, задает меридиан детали; угол, изменяющийся от 0

до 180, задает участок выбранного меридиана, при условии введения его начального и конечного значения. Кроме этого, задается число точек на выбранном участке меридиана, по которым рассчитывается неравномерность толщины покрытия, и число интервалов, на которое разбивается непрерывная траектория перемещения точек детали.

Параллель выбирается по значению полярного угла, а ее участок по начальному и конечному значению угла. Однако стоит отметить, что расчет неравномерности толщины покрытия по параллелям детали для данной схемы практически не используется. Если деталь вращается с постоянной угловой скоростью и расчет проводится за 1 оборот детали, то очевидно, что толщина покрытия по параллели детали будет одинаковой.

Задаем параметры МРС:

$D_d = 20$ мм;

$H_d = 100$ мм;

$D_{s1} = 180$ мм;

$L_{s1} = 45$ мм;

$H_{s1} = 77$ мм;

$D_{s2} = 140$ мм;

$L_{s2} = 80$ мм;

$H_{s2} = 77$ мм;

Неравномерность толщины покрытия (h/h_0) - 8%.

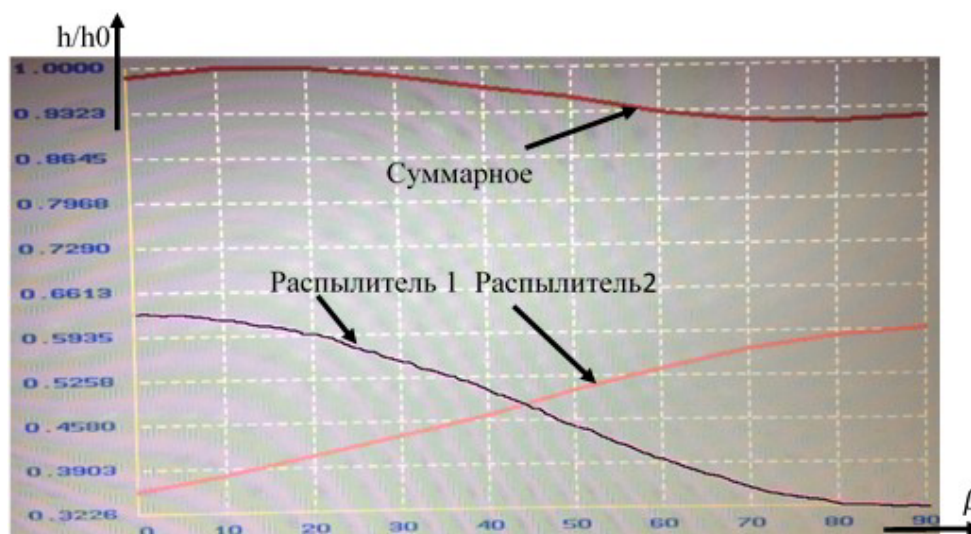


Рис. 5. Неравномерность толщины при заданных параметрах

Путем изменения величины HS1, HS2 (высоты мишеней распылителей) добиваемся оптимального значения h/h_0 (неравномерности толщины покрытия).

Выходные параметры:

$Dd=20$ мм;

$Hd=100$ мм;

$Ds1=180$ мм;

$Ls1=45$ мм;

$Hs1=84$ мм;

$Ds2=140$ мм;

$Ls2=80$ мм;

$Hs2=114$ мм;

Неравномерность толщины покрытия (h/h_0) - 4%.

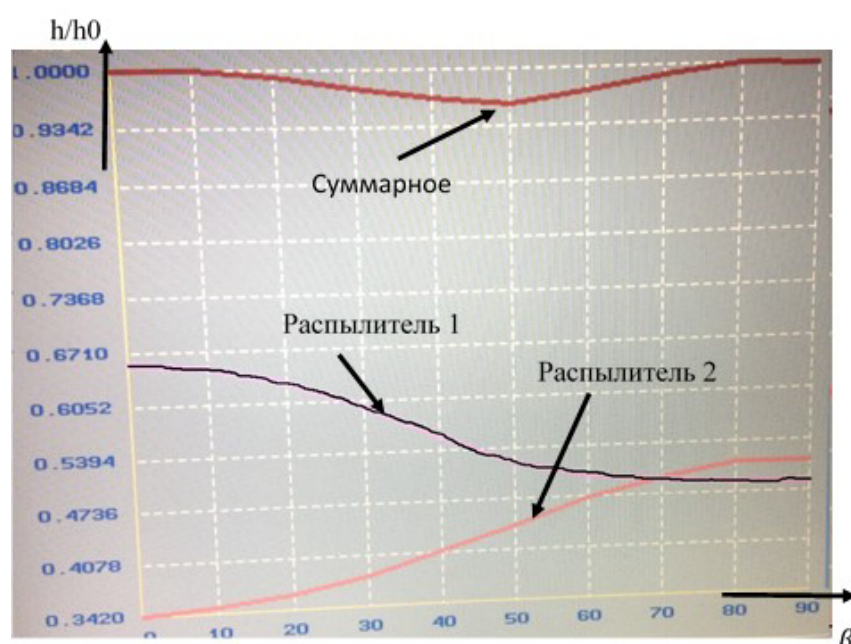


Рис. 6. Неравномерность толщины при оптимизированных значениях

Выводы

На основе сравнительного анализа был выбран магнетронный способ напыления, которым возможно адекватно заменить используемый на предприятиях метод КИБ.

Проведено исследование влияния технологических и геометрических факторов на неравномерность толщины износостойкого покрытия детали типа “полусфера”.

Найдены значения геометрических факторов МРС при которых неравномерность удовлетворяла бы производственным требованиям.

Список литературы

1. Мансуров Г.Н., Петрий О.А. Электрохимия тонких металлических пленок: монография. М.: МГОУ, 2011. 351 с.
2. Гурин Л.Б., Нестеренко Т.Г., Плотников И.А. Основы конструирования механизмов приборных систем. Томск: ТПУ, 2011. 344 с.
3. Jansson U., Lewin E. Sputter deposition of transition-metal carbide films: A critical review from a chemical perspective // Thin Solid Films. 2013. V.536. P. 1-24.
4. Сагатеян Г. Р., Шишлов А. В. Анализ распределения толщины тонкопленочного покрытия при магнетронном напылении на установках с планетарным перемещением подложки // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 11. DOI: 10.7463/1114.0733662.