

11, ноябрь 2015

УДК 621.793.71

**Исследование нанесения износостойкого алмазоподобного покрытия на
газодинамическую опору динамически настраиваемого гироскопа
лазерно-импульсным методом**

*Снежкова Е. Е., 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

В навигационных системах судоходства, авиации и космонавтики используют такие приборы, как гироскопы, в частности, динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ). Одной из главных составляющих ДНГ является газодинамическая опора (ГДО). ГДО состоит из двух частей: неподвижной (втулки) и подвижной (полусферы с отверстием). Газодинамические подшипники используются в конструкциях гироскопов в качестве опор главной оси. Полусферические газодинамические подшипники являются самоустанавливающимися подшипниками и менее чувствительны к погрешностям сборки. Ресурс работы газовых опор практически неограничен. При работе подшипниковых узлов на газовой смазке отсутствует взаимное касание рабочих поверхностей в установившемся режиме, но в кратковременные периоды пуска и останова в газодинамическом подшипнике скольжения имеет место сухое трение и касание поверхностей, когда вращающаяся часть садится на неподвижную часть опоры. На рабочих поверхностях ГДО напылены износостойкие покрытия из нитрида титана и алмазоподобного углерода. Такое покрытие защищает поверхности детали от трения и делает ее более износостойчивой. Существуют различные методики и установки для нанесения покрытия методом ионно-лучевого распыления. При этом атомы, вылетающие с поверхности мишени, осаждаются на подложку, образуя на ней пленку из материала мишени. Для поверхностей полусферических газодинамических подшипников этот метод

нанесения покрытия приводит к неравномерной толщине и недостаточной чистоте покрытия. В настоящей работе для нанесения износостойкого покрытия предлагается использовать метод лазерного импульсного напыления (лазерной абляции). Для этого был взят существующий патент [1] с установкой для нанесения покрытия методом лазерного импульсного напыления. Используемая в этом методе камера не приспособлена для равномерного напыления на детали в форме полусфер (выпуклой и вогнутой). Возникла необходимость ее усовершенствования.

В работе приведена усовершенствованная модель камеры, удовлетворяющая требованию нанесения равномерного покрытия на сферические поверхности. Для этого предложено ввести программируемое управление положением держателя вращающейся вокруг оси мишени таким образом, чтобы ось мишени дополнительно совершала колебания в горизонтальной плоскости с переменной угловой скоростью. В работе даны расчетные формулы и приведены графики, показывающие зависимость угловой скорости колебания оси мишени от значения угла ее поворота в горизонтальной плоскости. Представлены графики, показывающие зависимость угловой скорости колебания оси мишени от времени напыления.

Описание экспериментальной установки

За основу взята существующая установка для лазерного импульсного напыления из патента [1]. Схема этой установки изображена на рис. 1 (а). Процесс напыления включает вакуумную лазерную абляцию в реакционной камере с испарением мишени твердотельным лазером и последующим осаждением аморфного алмазоподобного покрытия в виде пленки на рабочую поверхность детали. Используют мишень из пиролитического графита и твердотельный лазер на основе алюмоиттриевого граната с неодимом, имеющий длину волны 532 нм, мощность 15-25 Дж, выходную энергию лазерного импульса 80-160 мДж, частоту следования импульсов излучения 50 Гц и длительность одного импульса $15 \cdot 10^{-9}$. Деталь размещают на расстоянии 10-25 см от мишени под углом 15-45°. Осаждение покрытия ведут в течение 10-40 минут при давлении в реакционной камере 6×10^{-4} Па.

Предлагаемая установка с усовершенствованной камерой представлена на рис. 1(б). Она включает вакуумную камеру 8 и твердотельный лазер 9. Необходимое значение вакуума $10^{-3} - 10^{-4}$ Па достигается с помощью вакуумной системы 7. В вакуумной камере размещена мишень 5, которая крепится на вращающемся держателе мишени 6. Вращение мишени необходимо для равномерного ее распыления и

образования плазмы испаренного материала 4. Внутри корпуса к боковой стенке вакуумной камеры крепятся рельсы 11, на которые поставлены салазки с установленным на них вращающимся держателем мишени. Салазки могут перемещаться по рельсам с запрограммированной скоростью, обеспечивая нужную угловую скорость вращения мишени для равномерного нанесения слоя. Необходимо, чтобы мишень находилась в центре вакуумной камеры, для того, чтобы поворачиваясь на определенный угол, центр ее сохранял постоянную позицию в пространстве. Так же в камере находится подложкодержатель 1, на котором крепится подложка 2. В качестве подложки для осаждения пленки используется полусфера или втулка. Когда луч лазера попадает на мишень, происходит резкое нагревание частиц мишени и затем нагретые частицы вылетают в виде плазмы в направлении нормали к плоскости мишени. Для того чтобы луч плазмы был узким и незначительно менял свою ширину на пути от мишени до детали, следует брать короткодействующие импульсы. Применяя такие импульсы, плазма летит параллельно нормали мишени, практически не расширяясь. Дополнительно применяется экранирование, препятствующее разлету частиц плазмы в стороны. Луч плазмы падает на напыляемую деталь, вращающуюся вокруг своей оси.

Так как вращающийся держатель мишени закреплен на салазках, которые имеют возможность перемещаться в горизонтальной плоскости по окружности, при перемещении салазок с запрограммированной скоростью обеспечивается равномерное нанесение покрытия. Отметим, что для обеспечения нужной точности равномерности покрытия скорость вращения напыляемой детали должна быть достаточно высокой. Чем больше скорость вращения, тем ровнее покрытие.

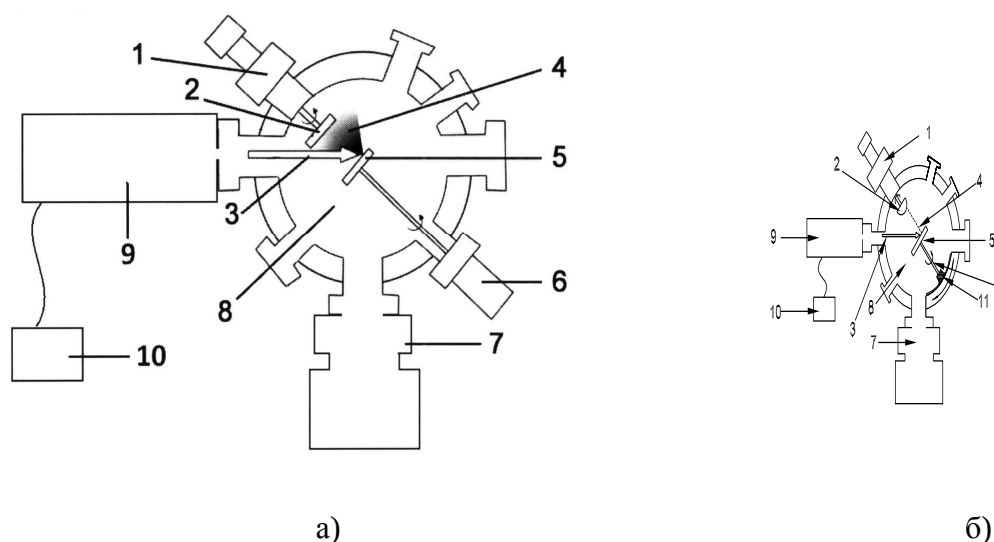


Рис. 1. Установка для лазерного импульсного напыления: а) из патента [1], б) разработанная установка. Основные элементы конструкции: 1 – подложкодержатель; 2 – полусфера/втулка; 3 – лазерный луч; 4 – плазма испаренного материала; 5 – графитовая мишень; 6 – вращающийся держатель мишени; 7 – вакуумная система; 8 – вакуумная камера; 9 – твердотельный лазер; 10 – персональный компьютер (ПК); 11 – направляющие рельсы

Расчетные формулы

Выведем формулы для зависимостей скорости углового вращения мишени $\omega(\varphi)$ и $\omega(t)$ от значения угла φ (см. рис. 2) и от времени t , необходимого для равномерного напыления вещества мишени на полусферу.

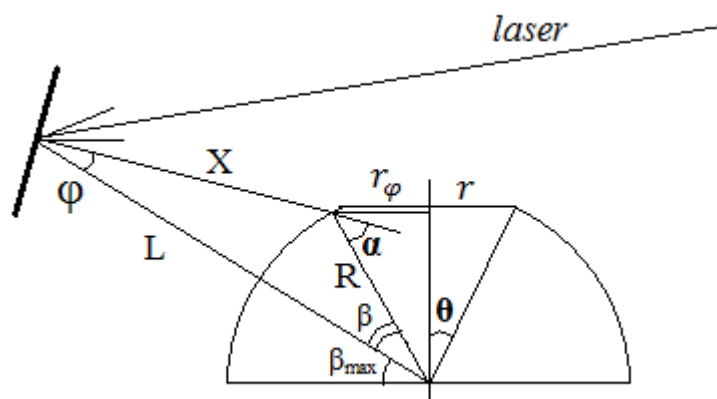


Рис. 2. Схема процесса напыления вещества мишени на полусферу

Введем обозначения:

h – толщина напыляемого слоя, м;

L – расстояние от мишени до центра полусферы, м;

R – радиус полусферы, м;

X – длина нормали мишени до точки пересечения с поверхностью полусферы, м;

$\sin \theta = r/R$, где r – радиус внутреннего отверстия полусферы.

Углы α , β , β_{max} и φ показаны на рисунке 2,

$$\beta_{max} = \frac{\pi/2 - \theta}{2}, \quad \alpha = \beta + \varphi.$$

С помощью простых тригонометрических преобразований имеем:

$$\sin \alpha = \frac{L}{R} \sin \varphi, \quad \cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha}.$$

Для расстояния от оси вращения до точки пересечения нормали мишени с поверхностью полусферы (отрезок X) в зависимости от угла φ получим:

$$r_\varphi = R \cos(\beta_{max} + \beta) = R[\cos(\beta_{max} - \varphi) \cos \alpha - \sin(\beta_{max} - \varphi) \sin \alpha].$$

Для X получим:

$$X = L \cos \varphi - R \cos \alpha.$$

Считая P – шириной луча плазмы, находим ширину полосы осаждения

$$\Delta l_\varphi = \frac{P}{\cos \alpha}.$$

Площадь напыляемой поверхности при заданном угле φ находим из следующей формулы:

$$S_\varphi = 2\pi r_\varphi \Delta l_\varphi = 2\pi r_\varphi \frac{P}{\cos \alpha}. \quad (1)$$

Масса вещества M , напыляемого на полосу для заданного угла φ , $M = \rho h S_\varphi$. С другой стороны, $M = nm \Delta t$, где n – частота импульсов, 1/с; m – масса вещества в одном импульсе, кг; ρ – плотность вещества, кг/м³, а Δt – время экспонирования луча при заданном φ , с.

Для времени экспонирования получим следующее выражение

$$\Delta t = \frac{\rho S_\varphi h}{nm}. \quad (2)$$

Имея в виду, что угол φ будет меняться в процессе напыления, найдем связь изменения угла φ с угловой скоростью поворота мишени $\omega(\varphi)$ и величинами X и P . При этом используем также малость изменения угла, и заменим длину хорды на соответствующую длину дуги окружности. Получим:

$$\Delta\varphi = \frac{P}{X} = \omega\Delta t. \quad (3)$$

Из выражений (1)-(3) находим зависимость угловой скорости вращения мишени ω от угла φ

$$\omega(\varphi) = \frac{P}{X\Delta t} = \frac{nm \cos \alpha}{2\pi r_\varphi X \rho h}.$$

Изменение угла поворота мишени φ от времени определяется решением нелинейного дифференциального уравнения

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega(\varphi). \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения (4) искалось численно с использованием простейшей разностной аппроксимации:

$$\varphi(t + \tau) = \varphi(t) + \tau \omega(\varphi(t)) ,$$

где τ – шаг численного интегрирования.

Аналогично выводится угловая скорость и для напыления на рабочую часть втулки. Схема напыления показана на рис. 3.

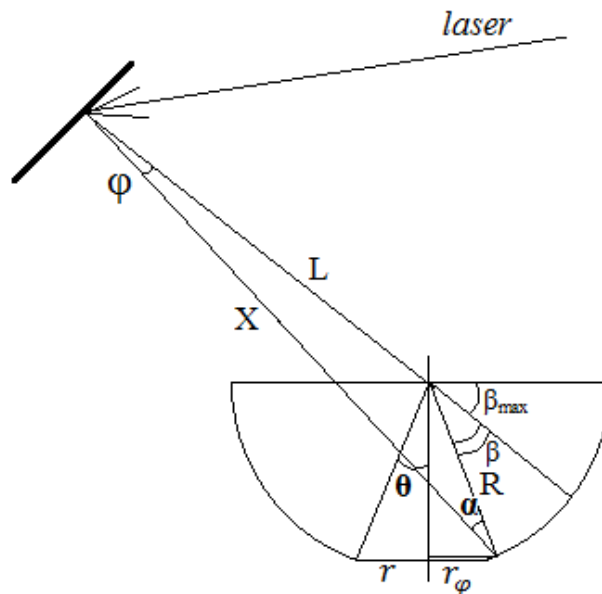


Рис. 3. Схема процесса напыления вещества мишени на полусферу рабочей части втулки

Расчетные формулы в этом случае выглядят следующим образом:

$$\beta_{max} = \frac{\pi/2 - \theta}{2}, \quad \alpha = \beta - \varphi,$$

$$\sin \alpha = \frac{L}{R} \sin \varphi, \quad \cos \alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha},$$

$$\begin{aligned} r_{\varphi} &= R \cos(\beta_{max} + \beta) = \\ &= R[\cos(\beta_{max} + \varphi) \cos \alpha - \sin(\beta_{max} + \varphi) \sin \alpha], \end{aligned}$$

$$X = L \cos \varphi + R \cos \alpha,$$

$$S_{\varphi} = 2\pi r_{\varphi} \Delta l_{\varphi} = 2\pi r_{\varphi} \frac{P}{\cos \alpha},$$

$$\Delta t = \frac{\rho S_{\varphi} h}{n * m},$$

$$\omega(\varphi) = \frac{P}{X \Delta t} = \frac{nm \cos \alpha}{2\pi r_{\varphi} X \rho h}.$$

Изменение угла поворота мишени φ от времени определяется решением нелинейного дифференциального уравнения

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega(\varphi).$$

Пример расчетов

Для примера возьмем типичные параметры прибора:

$$L=0.2 \text{ м};$$

$$n=50 \text{ 1/с};$$

$$m=1.7*10^{-9} \text{ кг};$$

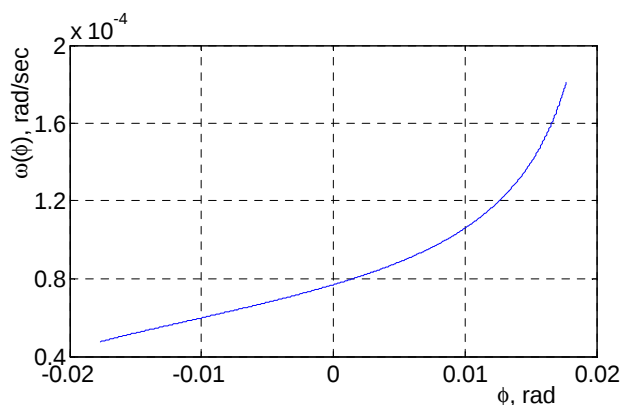
$$h=10*10^{-5} \text{ м};$$

$$\rho=2100 \text{ кг/м}^3;$$

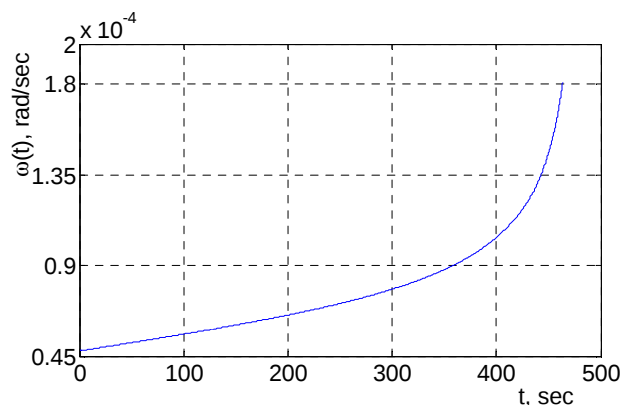
$$R=5.7*10^{-3};$$

$$r=1.5*10^{-3}.$$

Для данных параметров проведем вычисления в соответствии с методикой, описанной в предыдущем разделе. На рис. 4 и 5 в графической форме приведены результаты расчетов для рабочих поверхностей газодинамической опоры ДНГ. Вычисления проводились с использованием программы MatLab.

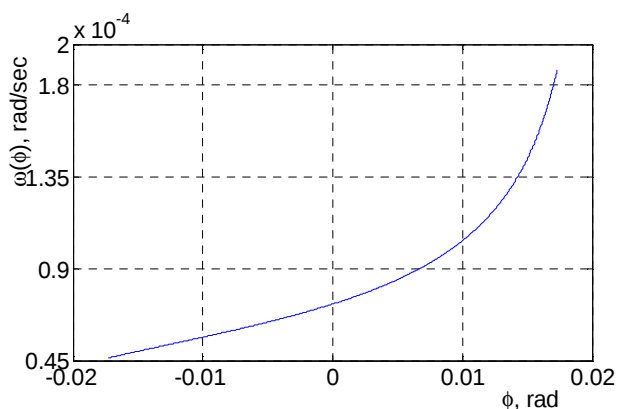


а)

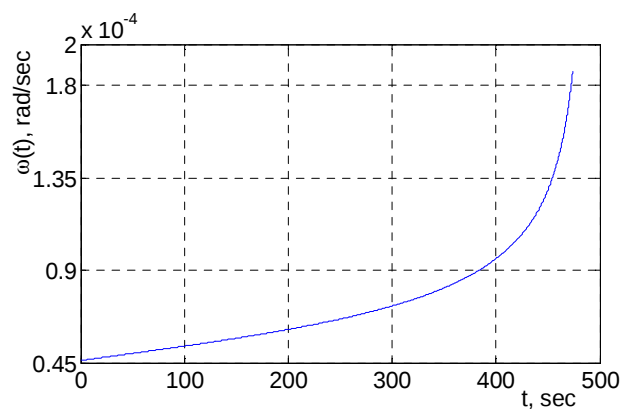


б)

Рис. 4. Зависимость угловой скорости вращения мишени ω от угла ее поворота ϕ (а) и от времени t (б) для выпуклой полусферы ГДО



а)



б)

Рис. 5. Зависимость угловой скорости вращения мишени ω от угла ее поворота ϕ (а) и от времени t (б) для вогнутой полусферы ГДО

Закключение

В ходе исследования была разработана установка с усовершенствованной вакуумной камерой, с помощью которой можно получать равномерное покрытие на полусферической поверхности. Были включены рельсы с перемещаемыми по ним салазками, на которые крепится держатель мишени. Так же разработана методика, которая делает возможным нанесение равномерного покрытия вещества мишени на полусферические рабочие поверхности газодинамической опоры. Были получены зависимости угловой скорости поворота мишени от угла ее поворота и от времени напыления, как для внешней поверхности полусферы, так и внутренней части втулки ГДО. Предложенная методика может быть расширена для напыления на поверхность более сложных деталей.

Список литературы

1. Белашов И.В., Алимов П.Н. Способ нанесения аморфного алмазоподобного покрытия: пат. 2527113 Российская Федерация. 2014. Бюл. № 24. 10 с.
2. Азаренков Н.А., Береснев В.М., Погребняк А.Д., Колесников Д.А. Наноструктурные покрытия и наноматериалы: Основы получения. Свойства. Области применения: Особенности современного наноструктурного направления в нанотехнологии. М.: URSS, 2012. 368 с.
3. Брозгуль Л.И. Динамически настраиваемые гироскопы: Модели погрешностей для систем навигации. М.: Машиностроение, 1989. 229 с.