

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАПЫЛЕНИЯ СВЕРХТОНКИХ ПОКРЫТИЙ НА УЗЛЫ ГИРОПРИБОРОВ

Представлена технологическая схема и средства оснащения процесса термического напыления пленок хрома толщиной 100–1000 Å на сферические поверхности прецизионных изделий. Предложены технические решения по методике контроля толщины покрытий непосредственно в процессе напыления. Приведены зависимости электропроводности пленок от их толщины и условий напыления, а также данные по влиянию покрытий на рабочие параметры изделий на примере сплошного бериллиевого ротора. Определены перспективы использования разработанной технологии для решения конкретных задач улучшения рабочих характеристик узлов гироскопов.

Введение

В технологии изготовления узлов гироскопов, в том числе имеющих сферическую форму, важен процесс нанесения на их поверхность различного рода покрытий: защитных, износостойких, токопроводящих и т.д. Примером могут служить износостойкие пленки нитрида титана на фланцах и опорах поплавкового гироскопа, хромовые электроды подвеса на полусферах гироскопа электростатического гироскопа и т. д. При этом покрытия должны в полной мере учитывать технические требования по прецизионности изделия в целом.

Особый интерес представляют сверхтонкие покрытия толщиной 100–1000 Å. Такие покрытия не оказывают практического влияния на геометрию и специфические параметры узла, но могут корректировать некоторые электрофизические свойства его поверхности. В качестве примера эффективного использования сверхтонких покрытий можно привести сплошной бериллиевый ротор бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ), на поверхность которого для снятия информации о положении ротора электрохимическим методом наносится растровый рисунок. Материал данного рисунка может изменять электрофизические свойства поверхности ротора, в частности вносить неоднородность электропроводности по всей поверхности сферы. Нанесение однородного сверхтонкого проводящего покрытия на поверхность ротора с рисунком без значительного ухудшения других характеристик ротора (дисбаланса, контрастности и т.д.) могло бы решить данную проблему.

Однако в процессе нанесения сверхтонких покрытий имеют место сложности как в технологии формообразования покрытий, так и в методике контроля этого процесса и оценки свойств и параметров пленок.

Цель работы – исследование технологического процесса напыления термическим и магнетронным методами сверхтонких покрытий на сферические узлы гироскопов на примере сплошного бериллиевого ротора бескарданного электростатического гироскопа.

Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо:

Беляев Сергей Николаевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ГНЦ РФ ОАО «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Щербак Александр Григорьевич. Доктор технических наук, начальник сектора ГНЦ РФ ОАО «ЦНИИ «Электроприбор».

- разработать технологическую схему и методику объективного контроля свойств покрытия непосредственно в процессе его нанесения;
- выявить корреляцию между интервалами времени нанесения покрытия требуемой толщины на неподвижную плоскую и вращающуюся сферическую поверхности;
- определить зависимость основных свойств тонкопленочного покрытия от его толщины;
- проанализировать влияние покрытия на основные функциональные характеристики узлов гиросприборов на примере сплошного ротора БЭСГ.

Разработка схемы текущего контроля электросопротивления покрытия в процессе напыления

В качестве основной технической характеристики тонкопленочного покрытия исходя из перспектив практического применения сверхтонкого покрытия на роторе БЭСГ была принята электропроводность. С учетом известных методик и технических решений [1], определяющих ранжированную совокупность локальных критериев, в качестве материала покрытия был выбран хром, имеющий в тонких слоях относительно высокие электропроводность и твердость [2, 3].

К роторам БЭСГ [4] предъявляется ряд технических требований, которые должны сохраняться и после нанесения покрытия:

сохранение дисбалансов ротора в пределах допуска (радиальный дисбаланс $e_p = 0,08 \pm 0,12$ мкм, осевой дисбаланс $e_o \leq 0,05$ мкм);

сохранение геометрии ротора в пределах допуска (амплитуды гармоник $A_2 \leq 0,06$ мкм, $A_3 \leq 0,03$ мкм, $A_4, A_5, A_6 \leq 0,02$ мкм);

сохранение контрастности растрового рисунка ротора на уровне $k = 0,7 \pm 0,1$ (при равномерности нанесения рисунка 15 %);

сохранение электрофизических свойств ротора с напыленным покрытием (удельное электросопротивление поверхности ротора порядка $0,04$ мкОм·м, что соответствует удельному электросопротивлению бериллия).

На первом этапе работ решалась основная задача – выявление технических решений по методике контроля свойств покрытий толщиной от 100 до 1000 Å непосредственно в процессе напыления с разработкой средств оснащения этого процесса. Определены основные принципы методики контроля толщины покрытия и построения процесса нанесения пленки.

1. Текущий контроль величины электросопротивления R покрытия, которое осаждается на плоскую поверхность диэлектрической пластины, на дорожке заданной геометрии.

2. Пересчет величины удельного электросопротивления ρ в толщину пленки h по экспериментально полученной зависимости между этими параметрами.

3. Определение времени процесса напыления покрытия на сферу при достижении фиксированного значения электросопротивления пленки, которое соответствует необходимой толщине покрытия.

На рис. 1 представлена схема контроля толщины покрытия в процессе напыления. На края стеклянной пластины методом термического испарения в вакууме напылены клеммы толщиной 3-4 мкм из хрома, к которым подсоединялись коммутационные провода. Эти провода через гермовводы в стенке вакуумной камеры напылительной установки выводились на измеритель электросопротивления. Напыление на дорожку заданной ширины между клеммами осуществлялось одновременно с напылением на изделие (ротор БЭСГ), причем и пластина, и ротор находились в идентичных условиях (расстояние от испарителя и температура нагрева). Таким образом, в процессе напыления постоянно контролировалась величина сопротивле-

ния между клеммами, которая с помощью градуировочной кривой позволяла определить текущую толщину пленки и обеспечить управляемый характер процесса напыления.

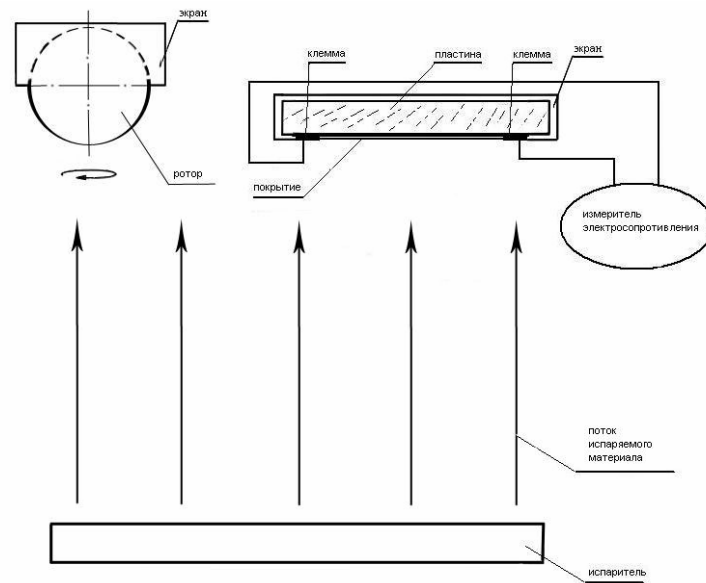


Рис. 1. Схема контроля толщины покрытия в процессе напыления

На рис. 2 приведена зависимость удельного электросопротивления хромового покрытия ρ от его толщины h .

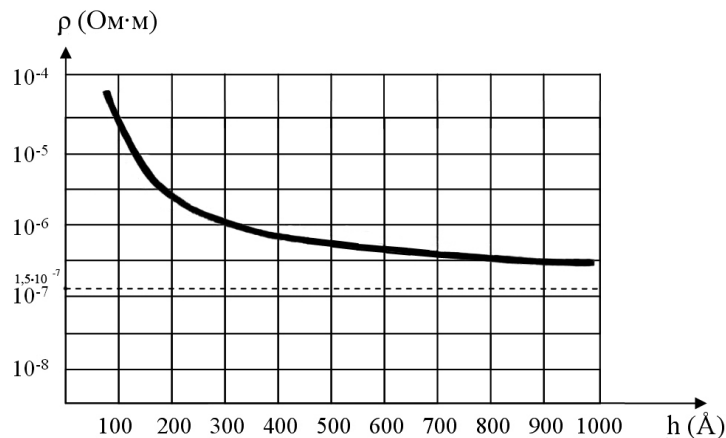


Рис. 2. Зависимость удельного электросопротивления хромового покрытия от толщины

Зависимость $\rho = f(h)$ по характеру близка к экспоненциальной, при этом при росте h ρ приближается к предельной величине, равной $1,5 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, соответствующей табличному значению удельного электросопротивления массивного хрома [5].

На рис. 3 представлены стеклянные пластины с напыленными пленками хрома различной толщины. В интервале 100–400 Å пластины в видимом свете являются полупрозрачными, и эффект уменьшения прозрачности стеклянных пластин также можно использовать для оценки толщины покрытия, однако электрические пара-

метры являются более объективным показателем, поскольку контролируются непосредственно в процессе напыления. Было установлено, что изменение электрофизических характеристик поверхности ротора возможно при толщине покрытия более $700 \text{ \AA}$ (см. рис. 2).

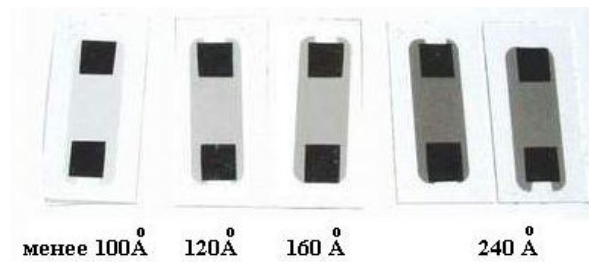


Рис. 3. Стекланные пластины с напыленными пленками хрома различной толщины

Разработка технологии напыления сверхтонких покрытий на ротор методом термического испарения в вакууме

Для более объективной оценки электрические свойства тонкопленочного покрытия, которые контролировались на плоских пластинах, дополнительно проверялись и уточнялись на керамических сферических образцах диаметром 10 мм, который соответствует диаметру сплошного ротора БЭСГ.

Проводилась оценка возможности нанесения покрытия методом термического испарения в вакууме [6] на сферу посредством поочередного нанесения шести шаровых сегментов с частичным перекрытием слоев (рис. 4).

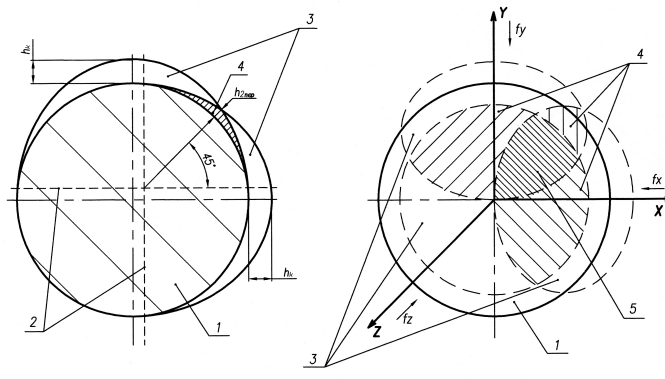


Рис. 4. Схема поочередного нанесения на ротор шести шаровых сегментов покрытия с частичным перекрытием слоев:

1 – ротор; 2 – плоскости ограничения зоны сегментов покрытия; 3 – зоны нанесения сегментов покрытия; 4 – области двойного перекрытия сегментов покрытия; 5 – область тройного перекрытия сегментов покрытия.

h_k – толщина покрытия, контролируемая в процессе напыления; $h_{2пер}$ – толщина двойного перекрытия сегментов покрытия; f_x, f_y, f_z – потоки напыляемого материала по осям x, y и z соответственно

Разработка технологии одностороннего напыления хромового покрытия на сферические сплошные роторы БЭСГ обусловлена необходимостью в некоторых слу-

чаях корректировать дисбаланс роторов на уровне сотых долей микрометра, что связано с особенностями метода термического напыления в вакууме, позволяющего получать на полусферической поверхности ротора (см. рис. 4) покрытие переменной толщины, монотонно увеличивающейся от нулевого значения в зоне контакта ротора с трафаретом (плоскость ограничения 2) до расчетной задаваемой величины в точке, обращенной к испарителю.

Толщина покрытия в зонах двойного перекрытия сегментов составляла $0,85 \div 0,95$ от контролируемой (максимальной) толщины сегмента покрытия. На схеме также имеются участки тройного перекрытия сегментов покрытия, толщиной $0,95 \div 1,05$ от контролируемой толщины сегмента покрытия.

В рамках работы была разработана технология магнетронного напыления сверхтонких проводящих пленок с использованием устройства вращения [7], обеспечивающего равномерность нанесения покрытия по всей сферической поверхности ротора за один технологический цикл.

Экспериментально установлено, что при магнетронном напылении соотношение скоростей осаждения хрома и толщин покрытия на вращающейся сфере и покрытия на неподвижной плоскости при равных условиях составляет 1:3, что позволяет определять время напыления на вращающийся ротор при контроле толщины пленки на плоской пластине (см. рис. 1).

Преимуществом магнетронного метода является возможность нанесения покрытий толщиной $\sim 2\text{--}3$ мкм с последующей сферодоводкой и балансировкой ротора по покрытию.

Основные параметры роторов БЭСГ со сверхтонкими покрытиями

Покрытия толщиной от 100 до 1000 Å, как установлено посредством измерения угловыми датчиками прибора БЭСГ, практически не влияют на изменение контрастности растрового рисунка ротора. В процессе работ не установлено существенного влияния напыления сверхтонких покрытий на дисбаланс и геометрию ротора при напылении методом термического испарения в вакууме и магнетронным методом.

Процесс нанесения сверхтонкого покрытия хрома на ротор БЭСГ методом термического испарения в вакууме осуществляется со скоростью испарения $0,040\text{--}0,065$ мкм/мин в вакууме $(5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. при температуре нагрева детали (573 ± 7) К (при расстоянии испаритель-деталь 70 мм и мощности накала испарителя 1 кВт).

Значения осевого и радиального дисбалансов роторов после напыления изменяются незначительно ($0,005\text{--}0,03$ мкм), оставаясь в пределах допустимых значений. При этом разработанная технология напыления последовательного нанесения на ротор шести шаровых сегментов покрытия позволяет регулировать величину радиального дисбаланса роторов в пределах $\pm 0,025$ мкм.

Значения коэффициента контрастности k и равномерности рисунка на роторе при толщине покрытия h от 120 до 400 Å практически не меняются:

- для покрытия 120 Å коэффициент контрастности 0,466 и 0,471, равномерность 6,66 и 6,42%;
- для покрытия 400 Å коэффициент контрастности 0,723 и 0,698, равномерность 7,94 и 7,50%.

Покрытие хрома толщиной 1000 Å, которую можно считать предельно возможной, оказывает более существенное влияние на указанные оптические параметры, изменяя коэффициент от 0,758 до 0,491, а равномерность от 5,99 до 13,93%.

Геометрия ротора до и после процесса нанесения покрытия толщиной до 1000 Å по результатам измерения шести гармоник остается в пределах допуска, значения амплитуд $A_2 - A_6$ меняются незначительно (в пределах 0,003–0,009 мкм).

Заключение

Показана возможность нанесения на прецизионные узлы giroприборов тонкопленочных токопроводящих покрытий, имеющих регистрируемую величину электросопротивления.

Разработаны принципы, исходные условия и технологическая схема процесса напыления сверхтонких хромовых покрытий толщиной от 100 до 1000 Å на сферические изделия.

Определены зависимости удельного электросопротивления пленок хрома от их толщины, а также влияние толщины покрытия на основные параметры таких реальных изделий, как сплошные бериллиевые роторы бескарданного электростатического гироскопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев, С.Н. Технологические особенности выбора материалов и методов напыления узлов giroприборов // Изв. вузов. Приборостроение. Т. 52, № 3.- 2009.
2. Свойства элементов: Справочник / Под ред. М.Е.Дрица.- М.: Металлургия, 1985.
3. Розбери, Ф. Справочник по вакуумной технике и технологии / Пер. с англ. - М.: Энергия, 1972.
4. Ландау, Б.Е. Электростатический гироскоп со сплошным ротором // Гироскопия и навигация.- 1993.- № 1.
5. Майсел, Л. Технология тонких пленок: Справочник / Л. Майсел, Р.Гленг. - М.: Сов. радио, 1977.
6. Хокинг, М. Металлические и керамические покрытия / М.Хокинг, В.Васантасри, П.Сидки.- М.: Мир, 2000.
7. Беляев, С.Н. Средства оснащения процессов напыления покрытий на узлы giroприборов, имеющие форму тел вращения / С.Н.Беляев, А.Г.Щербак // X конференция молодых ученых «Навигация и управление движением».- СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008.

Abstract. The paper presents the process flowchart and equipment for thermal deposition of chrome films 100 – 1000 Å thick on the spherical surfaces of precision devices. Technical solutions to control the coating thickness during the deposition are proposed. Dependencies of the film electrical conductivity on its thickness and deposition conditions are given.
Potential of the developed method for enhancing the gyro assemblies performance is evaluated.

Материал поступил 24.12.09