

УДК 629.7.036:621.373

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОРРЕКТИРОВКИ ДИСБАЛАНСА СФЕРИЧЕСКОГО РОТОРА НА СТАДИИ НАПЫЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОКРЫТИЯ

О.С. Юльметова^{a,b}, М.А. Туманова^a, А.Г. Щербак^a

^a АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: olga@yulmetova.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 05.10.17, принята к печати 30.10.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1045-1051

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Юльметова О.С., Туманова М.А., Щербак А.Г. Исследование процесса корректировки дисбаланса сферического ротора на стадии напыления тонкопленочного покрытия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 6. С. 1045–1051. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1045-1051

Аннотация

Предложен метод корректировки дисбаланса ротора бескарданного электростатического гироскопа, основанный на управляемом распределении на поверхности бериллиевого ротора массы материала на стадии напыления покрытия нитрида титана методом катодно-ионной бомбардировки. Напыление осуществляется с использованием одного дугового источника из материала ВТ-1-00, расположенного в горизонтальной плоскости вакуумной камеры установки Булат-6, при давлении азота $1,2 \cdot 10^{-3}$ Па. Температура нагрева ротора при напылении составляет 300°C , при которой возможные искажения формы, благодаря высокой размерной стабильности бериллия, лежат в пределах допуска не более сотых долей микрометра. За время напыления 30 мин на сферической поверхности ротора диаметром 10 мм формируется покрытие нитрида титана толщиной порядка 1 мкм. Корректировку дисбаланса предложено осуществлять посредством формирования покрытия с образованием наружной сферической поверхности, центр которой смещен относительно геометрического центра ротора на заданную величину в сторону, противоположную направлению вектора дисбаланса ротора. Требуемое смещение определяется кинематикой ротора в процессе напыления и обеспечивается разработанным устройством, имеющим три степени свободы: две вращательные – постоянное и циклическое вращение вокруг двух различных осей ротора, и возвратно-поступательное перемещение ротора относительно источника напыляемого материала вдоль оси потока этого материала. Разработанное устройство предполагает крепление сферического ротора в четырехугольный зажим. Выполнен расчет схемы фиксации ротора в этом зажиме, обеспечивающий размещение позиций контактных игольчатых упоров с ротором за пределами области растрового рисунка, формируемого в экваториальной зоне ротора в ходе следующей операции лазерной маркировки. Экспериментальные данные показали возможность изготовления реальных роторов с точностью корректировки дисбаланса до сотых долей микрометра.

Ключевые слова

гироскоп, ротор, ионно-плазменные технологии, дисбаланс, тонкопленочные покрытия, растровый рисунок

INVESTIGATION ON CORRECTING PROCESS OF SPHERICAL ROTOR IMBALANCE AT THIN FILM DEPOSITION STAGE

O.S. Yulmetova^{a,b}, M.A. Tumanova^a, A.G. Scherback^a

^a Concern "CSRI "Elektropribor", JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: olga@yulmetova.ru

Article info

Received 05.10.17, accepted 30.10.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1045-1051

Article in Russian

For citation: Yulmetova O.S., Tumanova M.A., Scherback A.G. Investigation on correcting process of spherical rotor imbalance at thin film deposition stage. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 6, pp. 1045–1051 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-6-1045-1051

Abstract

We propose a method of rotor imbalance correction for electrostatic gyroscope. The method is based on redistribution of the material on the beryllium rotor surface during deposition of the titanium nitride coating by cathodic arc physical vapor deposition (Arc-PVD) technique. The deposition process is carried out using one arc source made of VT-1-00 material, located in the horizontal plane of the vacuum chamber of "Bulat-6" installation at nitrogen pressure of $1.2 \cdot 10^{-3}$ Pa. Size distortion of the rotor caused by thermal expansion during heating to 300 °C, is not more than one hundredth of a micrometer because of the high dimensional stability of beryllium. The titanium nitride coating with a thickness about 1 μm is formed during 30 min deposition on the spherical surface of the rotor with a diameter of 10 mm. The imbalance correction is achieved by deposition of the coating with the center of the coating sphere displaced relative to the geometrical center of the rotor in the direction opposite to the direction of the rotor imbalance vector. The required displacement is determined by the rotor kinematics during the deposition process and is provided by the developed device with three degrees of freedom: two rotational ones – constant and cyclic around two different axes of the rotor, and reciprocating displacement of the rotor relative to the source of the sputtered material along the flow axis of this material. The developed device provides fastening of the rotor in four-needle clamp. The calculation of rotor fixation scheme in this clamp is carried out, ensuring the positioning needles outside the area of the raster pattern formed in the rotor equatorial zone during the next laser marking operation. The experimental data showed that it is possible to produce real rotors with the imbalance correction accuracy within two decimal places of a micrometer.

Keywords

gyroscope, rotor, ion-plasma technologies, imbalance, thin-film coatings, pattern

Введение

Перспективы дальнейшего развития и совершенствования бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ) во многом связаны с улучшением параметров его основного конструктивного элемента – сплошного бериллиевого ротора [1, 2]. Особенностью изготовления сплошного ротора БЭСГ является необходимость обеспечения требований по номинальному диаметру, отклонению от круглости и величинам осевого и радиального дисбалансов, лежащих в пределах сотых долей микрометра. Традиционным технологическим методам, используемым при изготовлении ротора, присущи противоречия, связанные с тем, что устранение дисбаланса механической доводкой трубчатым притиром [3] ухудшает форму ротора, а восстановление параметров формы, также связанное со съемом материала, ухудшает дисбаланс. Противоречивый характер процессов механической балансировки и сферодоводки роторов определяет актуальность и важность разработки принципиально новых методов и средств, основанных на технологиях ионно-плазменной обработки [4, 5], которые позволяют решать задачи по обеспечению комплекса параметров роторов БЭСГ. Весьма значимым технологическим аспектом эффективного использования ионно-плазменных технологий является разработка средств технологического оснащения.

Объектом исследований в предлагаемой работе является ротор БЭСГ на стадии формирования на его сферической поверхности тонкопленочного функционального покрытия нитрида титана толщиной порядка 1,0 мкм с обеспечением точности формы и значения дисбаланса ротора на уровне сотых долей микрометра. Напыление осуществляется методом катодно-ионной бомбардировки (КИБ) с использованием одного дугового источника из материала VT-1-00, расположенного в горизонтальной плоскости вакуумной камеры установки Булат-6, при давлении азота $1,2 \cdot 10^{-3}$ Па.

Целью работы являлось исследование и разработка средства оснащения, обеспечивающего расширение технологических возможностей процесса изготовления ротора, позволяющего осуществлять корректировку дисбаланса на стадии формирования тонкопленочного покрытия.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- выбор схемы позиционирования и ориентации ротора, обеспечивающей минимизацию влияния погрешности выставки и экранирования элементов фиксации модуля для напыления на характеристики покрытия;
- разработка средства оснащения процесса напыления тонкопленочных покрытий, обеспечивающих решение многоцелевых задач в части корректировки дисбаланса ротора;
- определение значимых параметров технологии формирования функциональных элементов и разработка средств математического обеспечения, позволяющих управлять процессом формирования покрытия;
- выявление эмпирических зависимостей, определяющих корреляцию характеристик покрытия и величины дисбаланса ротора.

Расчет схемы фиксации сферического ротора

Для формирования тонкопленочного функционального покрытия нитрида титана на сферической поверхности ротора использовался модуль для напыления [6], фиксация ротора в котором осуществлялась подпружиненными к ротору игольчатыми упорами, как показано на рис. 1. При этом с одной стороны ротора 1 был расположен упор 9, а с другой – три упора 6, 7 и 8, образующие трехконцевую вилку.

В качестве исходного условия для крепления ротора можно определить наиболее надежную схему, при которой ротор фиксируется в четырех точках *a*, *b*, *c* и *d*, соответствующих вершинам правильной

трехгранной пирамиды (рис. 1). Одна точка d , соответствующая вершине пирамиды, располагалась со стороны одного полюса ротора, а три точки – a , b и c – со стороны другого полюса, в вершинах равностороннего треугольника, являющегося основанием этой пирамиды.

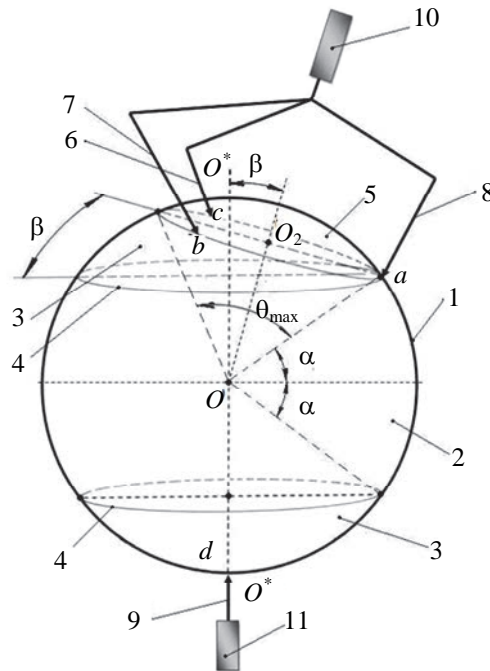


Рис. 1. Схема крепления ротора: 1 – ротор; 2 – зона шарового пояса, определяемая широтным углом α ; 3 – зоны сферических сегментов, свободные от растра; 4 – окружности, ограничивающие шаровой пояс; 5 – зона сферического сегмента, в котором размещаются упоры 6, 7, 8, 9; 10, 11 – муфты крепления упоров; β – угол, определяемый погрешностью выставки упоров

Поскольку на покрытии выполняется растровый рисунок с меридиональной протяженностью, определяемой углом α , важным условием является размещение позиций контакта упоров и ротора в зоне равных сферических сегментов 3 за пределами шарового пояса 2. Это требование можно реализовать, устанавливая указанные упоры в соосных муфтах 10 и 11 с пересечением осей игольчатых упоров 6, 7 и 8 в одной точке, лежащей на оси муфты 10.

В идеальном случае оси муфт 10 и 11 совпадают с осью O^*O^* ротора, и точки контакта подпружиненных упоров с поверхностью ротора лежат на окружности 4, определяемой границами рисунка. Это позволяет определить максимально возможное расстояние между точками контакта игольчатых упоров 6, 7 и 8 с поверхностью ротора, или сторону l_{\max}^0 треугольника, расположенного на плоскости, отсекающей сферический сегмент 5, и образованного точками a , b и c – $l_{\max}^0 = \sqrt{3}R \cos \alpha$, где R – радиус ротора. С другой стороны, можно определить сферический сегмент 5, в зоне которого с учетом погрешности выставки допускается контакт игольчатых упоров трехконцевой вилки с поверхностью ротора. Определяя очевидное соотношение длины стороны равностороннего треугольника abc , образованного точками контакта игольчатых упоров 6, 7 и 8 с поверхностью ротора, и радиуса $r=O_2a$ окружности, описанной около этого треугольника, и допуская, что погрешность наклона оси муфты 10 относительно оси O^*O^* ротора составляет угол β , можно получить зависимость максимально допустимого расстояния между позициями контакта игольчатых упоров 6, 7 и 8 с ротором:

$$l_{\max}^\beta = \sqrt{3}(R \cos \alpha - R \sin \alpha \tan \beta) \cos \beta. \quad (1)$$

Поскольку угол отклонения β можно считать малым, то выражение (1) примет следующий вид:

$$l_{\max}^\beta \approx \sqrt{3}R \cos \alpha - R\beta \sin \alpha \approx l_{\max}^0 - \delta l. \quad (2)$$

Выражение (2) определяет предельно допустимое расстояние между точками крепления игольчатых упоров при отклонении оси муфты 10 от оси ротора O^*O^* на угол β . Подставляя реальные значения $R = 5$ мм, $\alpha = 57^\circ$ и $\beta = 5^\circ$, получаем значение $\delta l \approx 0,6$ мм, $l_{\max}^\beta = 4,1$ мм.

Используя приведенный расчет, можно осуществить напыление покрытия таким образом, чтобы точки контакта оснастки с обрабатываемым узлом лежали за пределами зоны растрового рисунка.

Поскольку элементы фиксации размещены несимметрично относительно ротора, необходима оценка влияния указанной несимметрии на геометрические характеристики покрытия, а также на величину изменения дисбаланса ротора. Очевидно, что важным фактором является степень отклонения от номинальной толщины покрытия и зона экранирования, определяемая сферическим сегментом, который

характеризуется углом θ_{\max} , как это показано на рис. 1. Очевидно, что в наибольшей мере этот эффект проявляется в области, где размещается трехконцевая вилка. Радиус ротора с учетом экранирования можно задать следующим образом:

$$R(\theta) = \begin{cases} R + h - \Delta h \cos^2 \left(\theta \frac{\pi}{\theta_{\max}} \right), & |\theta| < \theta_{\max}, \\ R + h, & |\theta| > \theta_{\max}. \end{cases} \quad (3)$$

В выражении (3) величина Δh характеризует уменьшение толщины покрытия в зоне размещения трехконцевой вилки. Можно показать, что изменение дисбаланса ротора от исходной величины ε_0 до значения ε_k , обусловленное экранированием сферического сегмента 5 (рис. 1), определяется следующей зависимостью:

$$\varepsilon_k \approx \varepsilon_0 - \frac{1}{M_0} \rho_{\text{покр}} 2\pi(R_p + h)^3 \Delta h \frac{\pi^2 - \pi^2 \cos(\theta_{\max}) - 2\theta_{\max}^2}{8(\pi^2 - \theta_{\max}^2)}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{покр}}$ – плотность материала покрытия; h – толщина покрытия; Δh – уменьшение толщины на полюсе сферического сегмента, определяемого углом θ_{\max} .

В конечном счете можно определить зависимости изменения дисбаланса от величины Δh для данной толщины h (0,6–1,0 мкм) и различных углов θ . Очевидно, что, варьируя значением h , можно регулировать изменение дисбаланса. Из зависимости (4) следует, что уменьшение угла θ минимизирует негативный эффект экранирования. Практически при угле θ , равном 60° , и величине Δh , равной 0,01 мкм, изменение дисбаланса составляет 0,015 мкм. Получаемая при этом форма ротора определяет амплитуду третьей гармоники A_3 , которая не должна превышать 0,025 мкм. Осевой дисбаланс при этом должен составлять $\varepsilon_0 \leq 0,02$. Это позволяет определить требования к ротору, поступающему на операцию напыления, по форме и дисбалансу, которые должны учитывать возможные изменения указанных параметров в процессе напыления.

Корректировка дисбаланса ротора в процессе формирования покрытия

Эффективное техническое решение по корректировке дисбаланса связано с перераспределением материала покрытия по поверхности ротора [7] и формированием покрытия с образованием его наружной сферической поверхности, центр O^* которой смещен относительно геометрического центра O заготовки ротора на заданную величину δ в сторону, противоположную направлению вектора дисбаланса ε_0 ротора.

Моделирование процесса напыления [7], основанного на изменении по заданной программе расстояния L ротора от источника напыляемого материала, позволило определить зависимость величины корректируемого дисбаланса от амплитуды ΔL возвратно-поступательного перемещения ротора. Очевидно, что при этом необходимо учитывать особенности и закономерности процесса напыления [8–16].

Для практической реализации предложенной схемы было разработано устройство, представленное на рис. 2. При постоянном значении расстояния L_0 , определяющего положение ротора 1 от источника напыляемого материала 3, на роторе формируется покрытие одинаковой толщины с точностью в сотые доли микрометра. Равномерность покрытия обеспечивается тем, что ротор в процессе напыления после каждого оборота вокруг оси вращения M_1M_2 осуществляет циклический поворот вокруг дополнительной оси N_1N_2 . Штриховыми линиями на рис. 2 обозначены позиции, соответствующие минимальному $L_0 - \Delta L$ и максимальному $L_0 + \Delta L$ расстояниям ротора до источника 2.

Для формирования покрытия переменной толщины с центром наружной сферы покрытия, смещенным на заданную величину δ относительно центра ротора, в устройстве обеспечивается дополнительное циклическое возвратно-поступательное перемещение ротора вдоль оси потока напыляемого материала 4 с амплитудой ΔL отклонения ротора от среднего положения, определяемого расстоянием L_0 . Один цикл указанного перемещения соответствует повороту ротора вокруг основной оси вращения M_1M_2 на 360° .

Как показано на рис. 2, привод вращения 4 соединен с модулем посредством одноколенного вала 5, который является частью механизма, преобразующего вращательное движение привода 4 в возвратно-поступательное. Амплитуда ΔL указанного возвратно-поступательного перемещения задается тем, что одноколенный вал 5 связан с шатуном 6 через шарнир 7, а шатун посредством шарнира 8 соединен с упором 9, который жестко зафиксирован на основании камеры. Расстояние между осями шарниров 7 и 8, т.е. длина шатуна 6, составляет величину $L_1 = L_0$, а между осью вращения M_1M_2 привода 4 и шарниром 7 – ΔL . Оси привода вращения и упора, с которым связан шатун 6, расположены в одной плоскости, параллельной оси потока 3 напыляемого материала. Шарнирные соединения 7 и 8 выполнены с возможностью регулирования величиной L_1 и ΔL . Возвратно-поступательное перемещение ротора вдоль оси потока обеспечивается тем, что привод 5 установлен на направляющих 10, которые жестко закреплены на основании вакуумной камеры и задают требуемое направление перемещения привода с модулем и ротором.

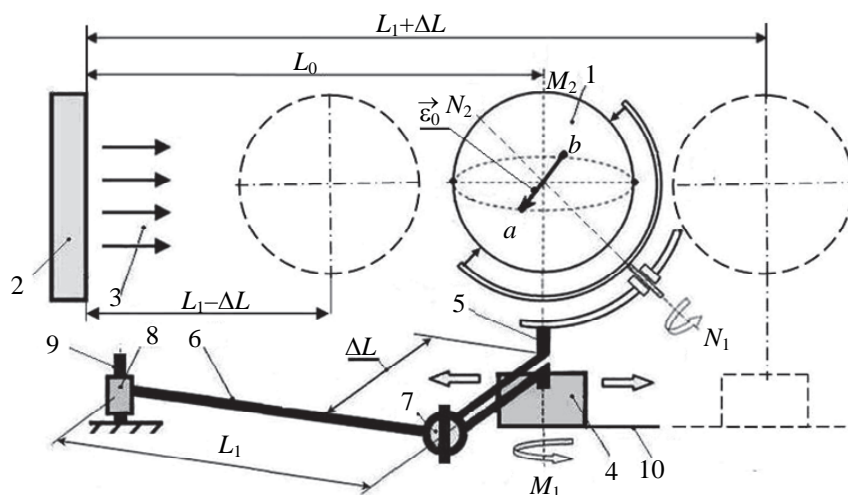


Рис. 2. Схема устройства для напыления: 1 – сферический ротор; 2 – источник напыляемого материала; 3 – поток напыляемого материала; 4 – привод вращения ротора 1 вокруг основной оси M_1M_2 ; 5 – одноколенный вал; 6 – шатун; 7, 8 – шарниры; 9 – упор; 10 – направляющая

Очевидно, что, когда ротор находится на расстоянии $L_0 + \Delta L$ от источника напыляемого материала и скорость осаждения минимальна, его необходимо ориентировать так, чтобы «тяжелое место» ротора было обращено в сторону источника. В этом случае на «тяжелом месте» ротора (точка a) формируется покрытие наименьшей толщины h_{\min} . Поскольку цикл указанного возвратно-поступательного перемещения соответствует повороту ротора вокруг основной оси вращения на 360° , то толщина покрытия будет монотонно меняться от минимальной величины h_{\min} до максимального значения h_{\max} . В результате напыления формируется наружная поверхность покрытия, которая является наружной сферой конечного ротора с центром, смещенным относительно центра ротора на величину δ .

Таким образом, в зависимости от корректируемого дисбаланса ϵ_0 процесс формирования покрытия переменной толщины обеспечивается последовательным выбором необходимой величины смещения δ , расстояния до источника напыляемого материала L_0 и амплитуды ΔL возвратно-поступательного перемещения ротора. Перераспределение материала на поверхности ротора при напылении связано с монотонным изменением толщины покрытия с привязкой характера этого изменения к вектору дисбаланса ϵ_0 заготовки ротора.

Обеспечение процесса формирования покрытия с корректировкой дисбаланса связано с выявлением на основе аналитических выражений [7] эмпирической зависимости, определяющей для толщины покрытия $h=1,0$ мкм взаимосвязь смещения центра покрытия δ и величин L_0 и ΔL :

$$\delta = \frac{B \left((L_0 + \Delta L)^{1,3} - (L_0 - \Delta L)^{1,3} \right)}{2(L_0 - \Delta L)^{1,3} (L_0 + \Delta L)^{1,3}}, \quad (5)$$

где B – размерная константа, равная $19,1 \text{ мм}^{2,3}$, величина которой была определена для конкретных условий, задавая период вращения ротора в модуле вокруг основной оси и толщину, получаемую за определенное время напыления.

В выражении (5) использована величина степенного показателя, равная 1,3, установленная на основе экспериментальных данных.

Учитывая, что величина смещения дисбаланса δ зависит от соотношения удельных плотностей материала ротора ($\rho_{\text{рот}}$) и наносимого покрытия ($\rho_{\text{покр}}$) по формуле

$$\delta = \frac{\epsilon_0}{\frac{\rho_{\text{покр}}}{\rho_{\text{рот}}} - 1}, \quad (6)$$

можно получить зависимость, определяющую взаимосвязь корректируемого дисбаланса ϵ_0 и значений L_0 и ΔL :

$$\epsilon_0 = \frac{B \left[(L_0 + \Delta L)^{1,3} - (L_0 - \Delta L)^{1,3} \right]}{2(L_0 - \Delta L)^{1,3} (L_0 + \Delta L)^{1,3}} \cdot \left[\frac{\rho_{\text{покр}}}{\rho_{\text{рот}}} - 1 \right]. \quad (7)$$

На основе эмпирического выражения (7) построен график, представленный на рис. 3 и позволяющий для требуемого значения корректируемого дисбаланса ϵ_0 выбирать сочетание значений L_0 и ΔL , определяющих условия корректировки дисбаланса на стадии формирования покрытия.

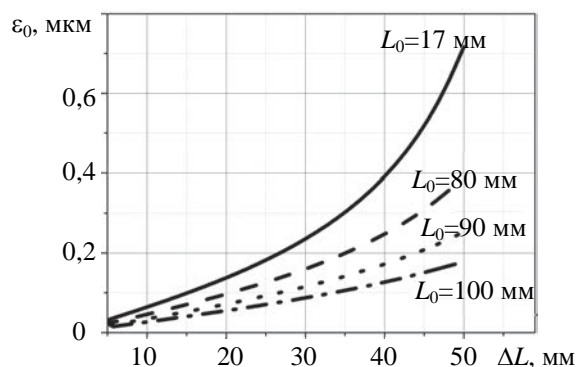


Рис. 3. Зависимости изменения дисбаланса ε_0 от амплитуды ΔL для различных расстояний L_0

Экспериментальная проверка процесса корректировки дисбаланса осуществлялась на макетном варианте устройства, в котором ротор был закреплен эксцентрично относительно привода, задающего его основную ось вращения. Эксперимент показал, что изменению дисбаланса на величину 0,06 мкм соответствует амплитуда $\Delta L=20$ мм при $L_0=100$ мм.

Заключение

На основе исследований процессов корректировки дисбаланса при нанесении на поверхность ротора бескарданного электростатического гироскопа тонкопленочного покрытия нитрида титана предложено средство технологического обеспечения, позволяющее повысить эффективность управления процессом формирования параметров ротора и расширить технологические возможности его изготовления. Разработанное средство оснащения процесса напыления тонкопленочных покрытий обеспечивает одновременное решение таких задач, как формирование износостойкого слоя покрытия нитрида титана и корректировка дисбаланса. Представленная схема фиксации ротора в модуле для напыления позволяет минимизировать влияние погрешностей выставки на характеристики покрытия и устранить появление локальных дефектов на стадии лазерного маркирования рисунка на поверхности ротора.

На практике были получены бериллиевые роторы, для которых осуществлялась корректировка дисбаланса от 0,20–0,30 мкм до 0,02–0,04 мкм за счет смещения центра сферы тонкопленочного покрытия нитрида титана относительно центра заготовки бериллиевого ротора на 0,12–0,15 мкм. Для модуля это соответствует величинам $L_0=100$ мм и $\Delta L=15$ мм. При этом точность формы ротора, характеризуемая амплитудами гармоник, обеспечивалась в пределах 0,06–0,010 мкм.

Литература

1. Ali R., Sebastiani M., Bemporad E. Influence of Ti-TiN multilayer PVD-coatings design on residual stresses and adhesion // *Materials and Design*. 2015. V. 75. N 15. P. 47–56. doi: 10.1016/j.matdes.2015.03.007
2. Bashir M.I., Shafiq M., Naeem M. et al. Enhanced surface properties of aluminum by PVD-TiN coating combined with cathodic cage plasma nitriding // *Surface and Coatings Technology*. 2017. V. 327. N 25. P. 59–65. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.08.015
3. Egorov A.V., Landau B.E., Levin S.L., Romanenko S.G. Rotor motion in a strapdown electrostatic gyro onboard an orbiting spacecraft // *Gyroscopy and Navigation*. 2012. N 3. P. 144–151. doi: 10.1134/S2075108712020034
4. Azar G.T.P., Yelkarasi C., Urgan M. The role of droplets on the cavitation erosion damage of TiN coatings produced with cathodic arc physical vapor deposition // *Surface and Coatings Technology*. 2017. V. 322. P. 211–217. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.050
5. Leppäniemi J., Sippola P., Broas M. et al. Corrosion protection of steel with multilayer coatings: improving the sealing properties of physical vapor deposition CrN coatings with Al₂O₃/TiO₂ atomic layer deposition nanolaminates // *Thin Solid Films*. 2017. V. 627. N 1. P. 59–68. doi: 10.1016/j.tsf.2017.02.050
6. Peshekhonov V.G. Gyroscopic navigation systems: current status and prospects // *Gyroscopy and Navigation*. 2011. V. 2. N 3. P. 111–118. doi: 10.1134/S2075108711030096
7. Vaz F., Ferreira J., Ribeiro E. et al. Influence of nitrogen content on the structural, mechanical and electrical properties of TiN thin films // *Surface and Coating Technology*. 2005. V. 191. N 2.

References

1. Ali R., Sebastiani M., Bemporad E. Influence of Ti-TiN multilayer PVD-coatings design on residual stresses and adhesion. *Materials and Design*, 2015, vol. 75, no. 15, pp. 47–56. doi: 10.1016/j.matdes.2015.03.007
2. Bashir M.I., Shafiq M., Naeem M. et al. Enhanced surface properties of aluminum by PVD-TiN coating combined with cathodic cage plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 327, no. 25, pp. 59–65. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.08.015
3. Egorov A.V., Landau B.E., Levin S.L., Romanenko S.G. Rotor motion in a strapdown electrostatic gyro onboard an orbiting spacecraft. *Gyroscopy and Navigation*, 2012, no. 3, pp. 144–151. doi: 10.1134/S2075108712020034
4. Azar G.T.P., Yelkarasi C., Urgan M. The role of droplets on the cavitation erosion damage of TiN coatings produced with cathodic arc physical vapor deposition. *Surface and Coatings Technology*, 2017, vol. 322, pp. 211–217. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.050
5. Leppäniemi J., Sippola P., Broas M. et al. Corrosion protection of steel with multilayer coatings: improving the sealing properties of physical vapor deposition CrN coatings with Al₂O₃/TiO₂ atomic layer deposition nanolaminates. *Thin Solid Films*, 2017, vol. 627, no. 1, pp. 59–68. doi: 10.1016/j.tsf.2017.02.050
6. Peshekhonov V.G. Gyroscopic navigation systems: current status and prospects. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 111–118. doi: 10.1134/S2075108711030096
7. Vaz F., Ferreira J., Ribeiro E. et al. Influence of nitrogen content on the structural, mechanical and electrical properties of TiN thin films. *Surface and Coating Technology*, 2005, vol.

- Р. 317–323. doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.01.033
8. Wang M., Ma G., Liu X., Dong C. Morphology and mechanical properties of TiN coatings prepared with different PVD methods // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2016. V. 45. N 12. P. 3080–3084.
 9. Wang Y., Li Z., Wang H. et al. Effect of multilayered structure on properties of Ti/TiN coating // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2017. V. 46. N 5. P. 1219–1224.
 10. Yulmetova O.S., Yulmetova R.R., Matyzhonok V.N. Research on the contrast of laser marks on precise surfaces of metal // *Proceedings of SPIE*. 2011. V. 7996. doi: 10.1117/12.886252.
 11. Федотов А.В., Агабеков Ю.А., Мачкин В.П. Многофункциональные нанокомпозитные покрытия // *Наноиндустрия*. 2008. № 1. С. 24–26.
 12. Фомичев А.М., Юльметова О.С., Беляев С.Н., Щербак А.Г. Устройство для напыления тонкопленочных покрытий на сферические роторы электростатического гироскопа. Патент РФ № 2555699. Бюл. 2015. № 5.
 13. Юльметова О.С., Туманова М.А., Щербак А.Г. Корректировка центра масс сферического ротора посредством варьирования конфигурации функционального покрытия // *Материалы XXX Конференции памяти Н.Н. Острякова*. 2016. С. 82–88.
 14. Юльметова О.С., Филиппов А.Ю., Ландау Б.Е., Беляев С.Н., Фомичев А.М., Леонова Г.Г., Щербак А.Г. Способ изготовления ротора электростатического гироскопа. Патент РФ № 2592748. Бюл. 2016. № 21.
 15. Юльметова О.С., Щербак А.Г., Вейко В.П. Перспективы использования ионно-плазменных и лучевых технологий при создании прецизионных узлов гироскопических приборов // *Изв. Вузов. Приборостроение*. 2017. № 1. С. 82–89. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-82-89
 16. Юрьев Ю.Н., Михневич К.С., Кривобоков В.П., Сиделёв Д.В., Киселева Д.В., Новиков В.А. Свойства пленок нитрида титана, полученных методом магнетронного распыления // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2014. Т. 16. № 4. С. 672–676.
 - 191, no. 2, pp. 317–323. doi: 10.1016/j.surfcoat.2004.01.033
 8. Wang M., Ma G., Liu X., Dong C. Morphology and mechanical properties of TiN coatings prepared with different PVD methods. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, vol. 45, no. 12, pp. 3080–3084.
 9. Wang Y., Li Z., Wang H. et al. Effect of multilayered structure on properties of Ti/TiN coating. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, vol. 46, no. 5, pp. 1219–1224.
 10. Yulmetova O.S., Yulmetova R.R., Matyzhonok V.N. Research on the contrast of laser marks on precise surfaces of metal. *Proceedings of SPIE*, 2011, vol. 7996. doi: 10.1117/12.886252.
 11. Fedotov A.V., Agabekov Yu.A., Machkin V.P. Multifunctional nanocomposite coatings. *Nanoindustrialiya*, 2008, no. 1, pp. 24–26. (In Russian)
 12. Fomichev A.M., Yulmetova O.S., Belyaev S.N., Shcherbak A.G. *Device for Sputtering of Thin Film Coatings on Spherical Rotor of Electrostatic Gyroscope*. Patent RU2555699, 2015.
 13. Yulmetova O.S., Tumanova M.A., Shcherbak A.G. Correction of mass center of the spherical rotor by varying of the functional coating configuration. *Materialy XXX Konferentsii pamyati N.N. Ostryakova*, 2016, pp. 82–88. (In Russian)
 14. Yulmetova O.S., Filippov A.Yu., Landau B.E., Belyaev S.N., Fomichev A.M., Leonova G.G., Shcherbak A.G. *Method for Making Electrostatic Gyroscope Rotor*. Patent RU2592748, 2016.
 15. Yulmetova O.S., Shcherbak A.G., Veiko V.P. Prospects for the use of ion-plasma and beam technologies when creating precision assemblies of gyroscopic devices. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 1, pp. 82–89. (In Russian)
 16. Yur'ev Yu.N., Mikhnevich K.S., Krivobokov V.P., Sidelev D.V., Kiseleva D.V., Novikov V.A. The properties of titanium nitride films, obtained by magnetron sputtering. *Izvestia RAS SamSC*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 672–676. (In Russian)

Авторы

Юльметова Ольга Сергеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, olga@yulmetova.ru

Туманова Маргарита Алексеевна – аспирант, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, rita93.07.93.07@gmail.com

Щербак Александр Григорьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, ascherbak1946@gmail.com

Authors

Olga S. Yulmetova – PhD, Senior Scientific Researcher, Concern "CSRI "Elektroprigor", JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, olga@yulmetova.ru

Margarita A. Tumanova – postgraduate, Concern "CSRI "Elektroprigor", JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, rita93.07.93.07@gmail.com

Alexander G. Scherback – D.Sc., Leading Scientific Researcher, Concern "CSRI "Elektroprigor", JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, ascherbak1946@gmail.com