

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ УЗЛОВ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

О. С. ЮЛЬМЕТОВА¹, А. Г. ЩЕРБАК¹, В. П. ВЕЙКО²,

¹Концерн ЦНИИ „Электроприбор“, 197046, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: olga@yulmetova.ru

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

На примере ротора бескарданного электростатического гироскопа рассматриваются перспективы использования ионно-плазменных и лучевых технологий при создании прецизионных узлов и обеспечении комплекса функциональных параметров. Предложены технические решения по формированию момента инерции ротора и корректировке его дисбаланса путем напыления покрытия переменной толщины на заготовку ротора, а также по управлению дисбалансом ротора посредством испарения локальной точечной массы. Приведены математические модели управления функциональными параметрами ротора на основе использования ионно-плазменных и лучевых технологий. Представлены результаты практической апробации разработанных моделей.

Ключевые слова: ионно-плазменные технологии, лазерная маркировка, вакуумное напыление, гироскопы

Введение. В настоящее время в технологии изготовления прецизионных приборов широко применяются ионно-плазменные и лучевые технологии (ИПиЛТ) благодаря высокой концентрации и локальности подводимой энергии, а также незначительному динамическому воздействию на обрабатываемую поверхность. Среди этих технологий можно выделить лазерную маркировку [1], ионное травление [2, 3], технологию формирования тонкопленочных покрытий методом катодно-ионной бомбардировки (КИБ) [4, 5]. Известны примеры лазерного легирования [6] для повышения твердости и износостойкости стальных деталей. Использование лазерных технологий в различных областях науки и техники [7] позволяет на качественно новом уровне решать технологические проблемы маркировки растровых рисунков [1, 8, 9], в том числе на прецизионных узлах гироскопических приборов [10], в частности сферическом роторе бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ) [11, 12].

Вместе с тем предложенные в известных исследованиях технические решения имеют преимущественно частный, адресный, характер и относятся к обработке конкретных материалов. При этом определенные обобщения, позволяющие распространить полученные результаты на более широкий круг технических ситуаций, вполне допустимы. Однако данные по обеспечению точности обработки на уровне сотых и тысячных долей микрометра, необходимые при создании перспективных изделий приборостроения, в том числе гироскопических приборов, приводятся лишь в отдельных публикациях [13—16].

Перспективы дальнейшего развития технологий создания гироскопических приборов во многом определяются применением именно ионно-плазменных и лучевых технологий.

Во-первых, возможности традиционных методов обработки практически исчерпаны, что не позволяет обеспечить требуемые точности. Во-вторых, необходима разработка технологий создания комплекса различных параметров гироскопических узлов.

В настоящей статье представлены результаты разработки технологических методов управления функциональными параметрами ротора бескарданного электростатического гироскопа на основе применения ИПиЛТ. При этом были решены следующие задачи:

— разработка структурной схемы, определяющей взаимосвязи функциональных параметров ротора с характеристиками поверхностных структур и конструктивных элементов, формируемых с использованием ИПиЛТ;

— разработка математических моделей управления динамическими и оптическими параметрами ротора на основе ИПиЛТ;

— оценка корректности полученных моделей и их апробация при изготовлении реальных изделий.

Структурная схема. Ротор бескарданного электростатического гироскопа — это важнейший конструктивный узел прибора, предназначенного для определения местоположения движущихся объектов ракетно-космической техники. Ротор можно представить как совокупность отдельных конструктивных элементов (сфера) и поверхностных структур (покрытие и растровый рисунок), формируемых с использованием ИПиЛТ. К основным параметрам ротора относятся динамические (момент инерции и дисбаланс), оптические (контраст рисунка), электрофизические (поверхностная проводимость) и геометрические; характеристики структур — толщина, структурно-фазовый состав, коэффициент отражения и т.д.

На рис. 1 представлена структурная схема корреляции функциональных параметров ротора с характеристиками формируемых на основе ИПиЛТ поверхностных структур и элементов.

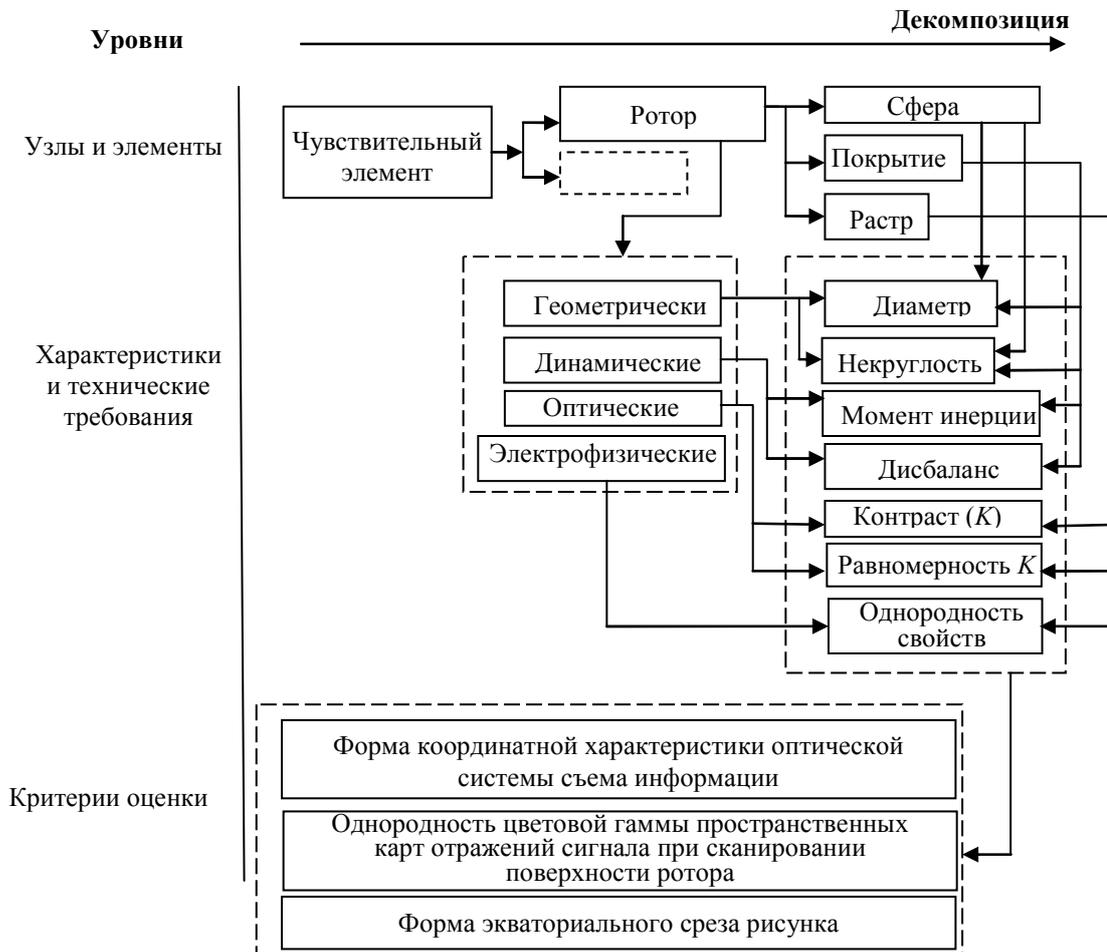


Рис. 1

В схеме использован принцип декомпозиции, на основании которого можно сгруппировать основные технические требования к указанным элементам и поверхностным структурам ротора:

— для сферического ротора: дисбаланс (осевая и радиальная составляющие) на уровне сотых долей микрометра, заданный диаметр в пределах $\pm 0,5$ мкм и некруглость не более сотых долей микрометра;

— износостойкое покрытие: высокие механические свойства (микротвердость порядка 20 ГПа) и равномерность толщины на уровне сотых долей микрометра;

— растровый рисунок: контрастность $K=0,5\dots 0,7$ с равномерностью контраста 90 % и высокой четкостью границ.

На схеме показаны также критерии оценки функционирования оптической системы съема (ОСС) информации, связанные с определением формы кривых нелинейности или координатных характеристик ОСС, с однородностью цветовой гаммы пространственных карт отражений сигнала при сканировании поверхности ротора и с оптическими характеристиками экваториального среза рисунка на поверхности ротора.

Используя системные подходы и определяя требования к гироскопу как основную цель, можно выделить совокупности технических требований:

— к узлам гироскопа (например, сферическому ротору);

— к составным элементам и поверхностным структурам этих узлов — для ротора это бериллиевая сфера, тонкопленочное покрытие нитрида титана и растровый рисунок;

— к условиям функционирования ОСС информации.

Обеспечение требуемых параметров ротора можно связать с конкретными техническими решениями и представить как построение алгоритма процесса изготовления ротора, где в совокупности приемов, методов и средств технологии могут быть и однозначно задаваемые, и альтернативные варианты. При этом моделирование процесса может включать и комбинирование элементов альтернативных решений.

Подобная структурная схема определяет основные направления и содержание исследований, поскольку детализация элементов схемы с использованием дополнительных критериев оценки позволяет сформировать согласованные требования к технологии изготовления и разрешить имеющиеся противоречия.

Например, явные противоречия наблюдаются в процессе изготовления ротора, где при его балансировке выполняются последовательные операции направленной доводки и сферодоводки. Направленная доводка, уменьшая дисбаланс, приводит к искажению геометрии ротора, а последующая сферодоводка, восстанавливая форму, вызывает изменение дисбаланса, т.е. имеет место неопределенность при комплексном обеспечении требований к форме (включая заданный диаметр и отклонения от круглости) и дисбалансу ротора.

Математические модели управления динамическими параметрами ротора. Рассмотрим сначала такой динамический параметр ротора, как момент инерции, который необходим для стабилизации вращения ротора вдоль одной из осей сферы. Применяемые сегодня методы формирования момента инерции сферических роторов основаны на внедрении в тело ротора армирующих вставок, что приводит к усложнению и удорожанию его изготовления. Одним из перспективных способов создания момента инерции ротора является формирование оси вращения O_1O_1 за счет напыления методом КИБ на эллипсоидную заготовку 1 покрытия 2 (рис. 2), толщина которого монотонно увеличивается от полюса к экватору ротора [17]. Ориентация ротора диаметром D (принято, что диаметр равен большой оси эллипсоида $2a$) относительно ионного потока в процессе напыления предполагает одну степень свободы ротора — вращение вокруг оси создаваемого момента инерции. Моделирование этого процесса можно определить как получение аналитических зависимостей, устанавливающих взаимосвязь

момента инерции J с характеристиками покрытия — разностью толщин $\Delta = a - b$ и диаметром $D = 2a$:

$$J = \frac{8}{15} \pi a \left[\rho_p b^4 + \rho_{\text{п}} (a^4 - b^4) \right], \quad (1)$$

где ρ_p — плотность ротора, $\rho_{\text{п}}$ — плотность покрытия, a и b — большая и малая полуоси исходной заготовки (эллипсоида вращения).

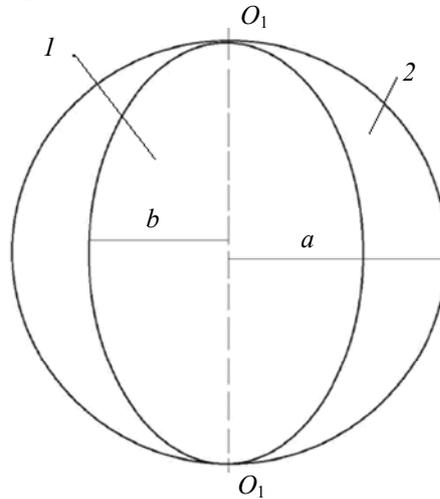


Рис. 2

Представленная схема (см. рис. 2) позволяет устранить недостатки упомянутой технологии формирования оси вращения ротора за счет запрессовки в его тело четырех равноудаленных от центра медных вставок [18], что создает неоднородность в теле ротора и затрудняет получение требуемых значений его дисбаланса и геометрических параметров.

Дисбаланс сферического ротора определяется как смещение центра масс ротора относительно его геометрического центра. Минимизация дисбаланса положительно сказывается на динамике ротора при его разгонах, а также на стабильности функционирования ротора в вакуумированной камере подвеса при вращении на скорости порядка 180 000 об/мин. Использование метода КИБ позволяет разработать модель, обеспечивающую возможность управления дисбалансом ротора за счет экранирования при напылении покрытия на полусферическую зону „тяжелого“ места ротора.

В упрощенном виде модель имеет следующий вид:

$$\Delta h = \frac{8}{3} \frac{R^3}{(R+h)^3} \frac{\rho_p}{\rho_{\text{п}}} \varepsilon_0, \quad (2)$$

где Δh — разница толщин покрытия, определяемая зоной экранирования; R — радиус ротора; h — толщина покрытия, обеспечиваемая параметрами процесса КИБ; ε_0 — корректируемое значение дисбаланса.

Схема корректировки дисбаланса в процессе напыления покрытия продемонстрирована на рис. 3, где 1 — сферическая заготовка ротора, 2 — покрытие.

Эффективное и имеющее перспективы развития техническое решение связано с моделированием процесса корректировки дисбаланса за счет лазерного испарения или ионного вытравливания локальной точечной массы (например, полусферической выемки) с поверхности ротора. Это решение позволяет управлять процессом устранения дисбаланса на уровне сотых долей микрометра. Можно показать, что смещение дисбаланса $\Delta \varepsilon$ определяется испаряемой массой:

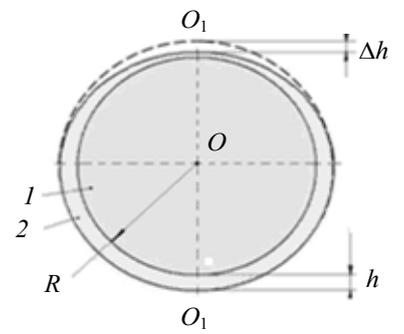


Рис. 3

$$\Delta\varepsilon \approx \frac{m}{M} R,$$

где m — масса выемки, M — масса ротора.

При этом угол θ наклона оси, на которой расположена указанная выемка, к динамической оси ротора определяется выражением

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\varepsilon_{\text{рад}} - \varepsilon_{\text{к(рад)}}}{\varepsilon_{\text{ос}} - \varepsilon_{\text{к(ос)}}} \right), \quad (3)$$

где $\varepsilon_{\text{рад}}$ и $\varepsilon_{\text{ос}}$ — радиальная и осевая составляющие корректируемого дисбаланса, $\varepsilon_{\text{к(рад)}}$ и $\varepsilon_{\text{к(ос)}}$ — радиальная и осевая составляющие требуемого конечного дисбаланса.

Представленные модели (1)—(3) позволяют регулировать динамические параметры ротора и могут быть применены в цикле изготовления сферических деталей и узлов чувствительных элементов электростатического и криогенного гироскопов.

Математические модели управления оптическими и электрофизическими свойствами ротора. В технологии изготовления узлов гироскопических приборов важным является формирование светоконтрастного растра — элемента ОСС информации. Эффективные методы управления контрастом [19] основаны на варьировании стехиометрического состава покрытия из нитрида титана на роторе БЭСГ, что позволяет в широких пределах менять цветовую гамму растра, формируемого лазерной маркировкой. В данном случае на стадии нанесения покрытия методом КИБ появляется дополнительный управляющий фактор — парциальное давление азота. Разработана модель, связывающая контрастность с режимами лазерной обработки [20]. На основе непараметрической и параметрической аппроксимации определена зависимость контраста K растрового рисунка от мощности P лазерного излучения:

$$K \approx 0,93 - 1,1 \cdot 10^4 e^{-P/0,148}. \quad (4)$$

Зависимость (4), определяющая области варьирования параметров лазерной обработки при формировании растровых рисунков, существенно расширяет технологические возможности лазерной маркировки за счет использования моделей на основе варьирования стехиометрического состава базовой маркируемой поверхности. К этим моделям относятся и термодинамические модели [21], определяющие алгоритм расчета изобарно-изотермических потенциалов и кинетической оценки топохимических взаимодействий при лазерном маркировании. Развитие экспериментально-исследовательских работ в направлении лазерного маркирования соединений нестехиометрического состава является весьма перспективным.

Важный аспект технологии лазерной маркировки — создание методов и средств управления электрофизическими свойствами поверхности гироскопических узлов. Так, в работе [21] показано, что используя такой управляющий фактор, как состав газовой среды, можно регулировать механизм образования модифицируемого слоя в процессе лазерной маркировки. Например, в среде инертного газа можно обеспечить только испарение материала и получать контраст за счет изменения топологии поверхности. В воздушной среде происходит окисление, т.е. образуется оксид металла покрытия и формируются диэлектрические свойства растра. Также перспективным можно считать лазерное легирование, в частности углеродом, поверхностного слоя металла с образованием карбидов, являющихся проводниками.

Апробация предложенных решений. Рассмотренные модели были использованы при разработке конкретных технологий лазерной маркировки [10, 19], что позволило решить следующие практические задачи:

— лазерная гравировка шкалы инклинометра (рис. 4) [22];

— бездеформационное лазерное окисление поверхности покрытия из нитрида титана с целью формирования раstra с контрастностью $0,5 \pm 0,05$ (рис. 5).

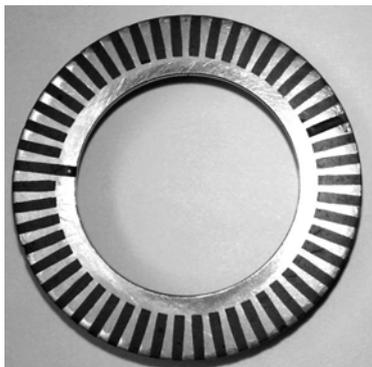


Рис. 4



Рис. 5

Положительные результаты практического использования предложенных моделей подтверждают их корректность и определяют важность развития исследований в направлении использования ионно-плазменных и лучевых технологий в приборостроении.

Заключение. На примере ротора бескарданного электростатического гироскопа показана эффективность комбинированного использования ионно-плазменных и лучевых технологий, что позволяет решать многоцелевые задачи и осуществлять комплексное управление такими функциональными параметрами ротора, как момент инерции, дисбаланс и контраст рисунка. Представленные математические модели управления функциональными параметрами ротора существенно расширяют технологические возможности процессов ионно-плазменной и лазерной обработки и обеспечивают качественно новый уровень разработки высокотехнологичных процессов изготовления изделий гироскопостроения.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-18-00201.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Veiko V., Odintsova G., Gorbunova E., Ageev E., Shimko A., Karlagina Y., Andreeva Y. Development of complete color palette based on spectrophotometric measurements of steel oxidation results for enhancement of color laser marking technology // *Materials and Design*. 2016. Vol. 89. P. 684—688.
2. Захаров К. А., Воронин Н. А. Применение технологии ионного травления при создании сухих газовых уплотнений [Электронный ресурс]: <http://science-bsea.narod.ru/2005/mashin_2005/zaharov_voronin.htm>.
3. Пат. 2517650 РФ. Способ изготовления газодинамического подшипника поплавкового гироскопа / О. С. Юльметова, С. Н. Беляев, А. Г. Щербак и др. // Бюл. № 15; 27.05.2014 г.
4. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия. М.: Мир, 2000. 520 с.
5. Данилин Б. С. Получение тонкопленочных слоев с помощью магнетронной системы ионного распыления. М.: Радио и связь, 1982. 266 с.
6. Бернацкий А. В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий // *Автоматическая сварка*. 2012. № 12 (727). С. 3—10.
7. Wehner M. Marking // *Excimer Laser Technology*; Ed: D. Basting, G. Marowsky. Springer, 2005. P. 321—330.
8. Antonczak A. J., Koccon D., Nowak M., Koziol P., Abramski K. A. Laser-induced colour marking—Sensitivity scaling for a stainless steel // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 264. P. 229—236.
9. Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Seleznev L. V., Sinityn D. V., Golosov E. V., Golosova O. A., Kolobov Yu. R., Ligachev A. E. Femtosecond laser color marking of metal and semiconductor surfaces // *Appl. Phys. A*. 2012. Vol. 107, N 2. P. 301—305.

10. Юльметова О. С., Щербак А. Г. Исследование процесса формирования светоконтрастного раstra посредством лазерного маркирования // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. № 05(69). С. 28—34.
11. Peshekhonov V. G. Gyroscopic navigation systems: Current status and prospects // Gyroscopy and Navigation. 2011. Vol. 2, N 3. P. 111—118.
12. Egorov 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. Vol. 3, N 2. P. 144—151.
13. Валетов В. А., Юльметова О. С., Щербак А. Г. Применение пучковых технологий при изготовлении узлов гироскопических приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 308—311.
14. Юльметова О. С., Щербак А. Г., Фомичев А. М., Новиков В. И. Использование плазменной и лучевой технологий для обработки узлов гироскопических приборов // Металлообработка. 2014. № 1(79). С. 17—20.
15. Пат. 2438151 РФ. Гравитационный вариометр / Г. Б. Вольфсон, О. С. Юльметова, А. Г. Щербак, М. И. Евстифеев // Бюл. № 36; 27.12.2011.
16. Пат. 2107355 РФ. Газовый электролюминесцентный детектор / А. Г. Щербак, Н. И. Беляев, В. В. Гребеничиков и др. Опубл. 27.02.1996.
17. Васильков С. Д., Юльметова О. С., Беляев С. Н., Щербак А. Г. Математическое моделирование ориентации деталей в процессе магнетронного напыления тонкопленочных покрытий на сферические поверхности // Металлообработка. 2014. № 1(79). С. 13—16.
18. Щербак А. Г., Кедров В. Г. Технология прецизионной диффузионной сварки в точном приборостроении. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 1997. С. 140—141.
19. Пат. 2498224 РФ. Способ изготовления ротора электростатического гироскопа / О. С. Юльметова, А. Г. Щербак, В. П. Вейко и др. Опубл. 10.11.2013.
20. Юльметова О. С., Щербак А. Г., Вейко В. П., Щербак С. А., Юльметова Р. Ф. Управление контрастностью растрового рисунка при лазерной маркировке: моделирование технологического процесса // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 6. С. 485—491.
21. Юльметова О. С., Щербак А. Г., Юльметова Р. Ф. Анализ химических взаимодействий при лазерном маркировании растрового рисунка на узлах гироскопических приборов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 05(75). С. 91—96.
22. Юльметова О. С., Мухаметов Р. М., Щербак А. Г. Разработка технологии формирования функциональных элементов на поверхности узлов гироскопических приборов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4(86). С. 118.

Сведения об авторах

- Ольга Сергеевна Юльметова** — канд. техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“; E-mail: olga@yulmetova.ru
Александр Григорьевич Щербак — д-р техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“; E-mail: a_sch@gtn.ru
Вадим Павлович Вейко — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра лазерных технологий и систем; заведующий кафедрой; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
лазерных технологий и систем Ун-та ИТМО

Поступила в редакцию
31.08.16 г.

Ссылка для цитирования: 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. Т. 60, № 1. С. 82—89.

PROSPECTS FOR THE USE OF ION-PLASMA AND BEAM TECHNOLOGIES WHEN CREATING PRECISION ASSEMBLIES OF GYROSCOPIC DEVICES

O. S. Yulmetova¹, A. G. Shcherbak¹, V. P. Veiko²,

¹Concern CSRI Elektropribor, JSC, 197046, St. Petersburg, Russia
E-mail: olga@yulmetova.ru

²ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

Prospects of applying ion-plasma and beam technologies (IPBT) to the production of cardan-less electrostatic gyro rotor with the high geometric accuracy and complex of functional parameters are considered. Technical solutions to the problem of formation of the moment of inertia of the spherical rotor and adjusting its imbalance by spraying the coating on the rotor surface with variable thickness and by local laser evaporation of point mass are proposed. Mathematical models for the management of the main rotor's functional parameters based on the use of IPBT are presented. The results of the practical application of the developed models are demonstrated.

Keywords: ion-plasma technologies, laser marking, vacuum deposition, gyroscopes

Data on authors

- | | | |
|--------------------------------|---|---|
| Olga S. Yulmetova | — | PhD, Concern CSRI Elektropribor; E-mail: olga@yulmetova.ru |
| Aleksander G. Shcherbak | — | Dr. Sci.; Concern CSRI Elektropribor; E-mail: a_sch@gtn.ru |
| Vadim P. Veiko | — | Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Laser Systems and Technologies; Head of the Department; E-mail: veiko@lastech.ifmo.ru |

For citation: 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 // Izv. vuzov. Priborostroyeniye. 2017. Vol. 60, N 1. P. 82—89 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-82-89