

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ СФЕРИЧЕСКИХ РОТОРОВ ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

О. С. ЮЛЬМЕТОВА^{1,2}, А. Г. ЩЕРБАК¹, Р. Ф. ЮЛЬМЕТОВА²

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

² Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются технологические методы формирования функциональных параметров ротора криогенного гироскопа, к которым относятся момент инерции и дисбаланс. В качестве материала ротора предложено использовать углеститалл, хорошо сочетающийся по физико-химическим свойствам с ниобием, имеющий, однако, сильную анизотропию свойств, что приводит к возникновению дисбаланса. Цель исследований связана с поиском технических решений по формированию моментов инерции и корректировке дисбаланса, вызванного анизотропией материала подложки ротора. Предложен комплекс качественно новых технологических методов и средств изготовления ротора криогенного гироскопа, связанных с согласованными операциями формообразования заготовки ротора из углеститалла и нанесения сверхпроводящего ниобиевого покрытия. Разработанная технология была запатентована и применена для изготовления экспериментального ротора криогенного гироскопа.

Ключевые слова: углеститалл, ниобий, ротор, криогенный гироскоп, дисбаланс

Использование сверхпроводящего криогенного гироскопа (КГ) в навигационных системах и комплексах позволяет существенно повысить их точность, поскольку дрейфовые ошибки, обусловленные нестабильностью свойств материалов узлов гироскопа, в значительной мере могут быть снижены благодаря специфическим особенностям сверхпроводников [1—3].

Примером успешной реализации криогенного гироскопа, работающего при сверхнизких температурах, является гироскоп [4, 5], созданный для проверки теории относительности, где экспериментально достигнутые уходы не превысили 10^{-9} °/ч. Развитие КГ связано с совершенствованием технологии изготовления его основного узла — сферического ротора, во многом определяющего точность и надежность гироскопа в целом [6].

Существующие технологии изготовления ротора КГ, например основанные на выращивании кварцевого ротора с требуемой изотропностью свойств материала [4, 5], имеют низкую технологическую воспроизводимость при высокой сложности практической реализации. Традиционные же способы создания моментов инерции сплошных сферических роторов, связанные с размещением армирующих элементов, выполненных в теле основы из материалов с большей плотностью, неприменимы для роторов из неметаллических материалов [7]. Практическая реализация указанных схем осуществляется запрессовкой проволочных отрезков [7], напылением кольцевого фрагмента, диффузионной сваркой сборочных единиц ротора [8, 9]. Использование этих методов применительно к заготовке из углеститалла крайне сложно вследствие невозможности применения технологии сварки к неметаллическим материалам,

в качестве которого выступает углеситалл. Кроме того, углеситалловые заготовки имеют явно выраженную анизотропию свойств по плотности материала, что приводит к значительному дисбалансу сферической основы ротора. В целом это не позволяет изготовить ротор с требуемыми функциональными параметрами — моментами инерции, несферичностью и минимальным дисбалансом.

Перечисленные факторы определяют актуальность и важность исследований и разработки качественно новых методов и средств изготовления сферических роторов криогенного гироскопа, что и является предметом исследований, описываемых в настоящей статье.

Согласно проведенным ранее исследованиям [10], наиболее эффективным по совокупности показателей является многослойный ротор КГ, в котором основой служит сферическая подложка из материала низкой плотности, а покрытием — ниобий, нанесенный электролитическим методом из расплава электролита, что обеспечивает наилучшие сверхпроводящие свойства покрытия. В качестве подложки используется имеющий сравнительно небольшую плотность углеситалл (борированный пироуглерод), который, в отличие от других материалов (бериллий, керамика, кварц), не взаимодействует с расплавом электролита [10].

Для достижения цели по поиску новых технологических методов и средств изготовления ротора необходимо решить следующие задачи:

- поиск технических решений по конфигурированию заготовки из углеситалла, обеспечивающих формирование динамических параметров ротора;
- разработка моделей процесса формирования моментов инерции ротора и корректировки дисбаланса заготовки;
- выявление зависимости моментов инерции и дисбаланса ротора от конфигурации заготовки и определение значимых факторов, позволяющих управлять процессом формирования динамических параметров ротора.

Основное исходное положение данного исследования — создание моментов инерции ротора за счет регулируемого распределения массы ниобиевого покрытия, формируемого на поверхности заготовки ротора. Используемый в качестве заготовки углеситалл согласован с ниобием по термическим коэффициентам линейного расширения, поэтому ниобиевое покрытие имеет достаточно хорошую адгезию к поверхности углеситалла.

Перспективные технические решения основаны на том, что формообразование заготовки I из углеситалла (рис. 1) производят посредством изготовления сферы диаметром $2R_1$. В зоне сферического пояса заготовки, определяемого широтным углом φ , осуществляется сьем материала в виде кольцевого фрагмента 2 (рис. 1, а), имеющего в средней части максимальную толщину l (толщина среза). Таким образом, фрагмент 2 с наружной стороны ограничен сферической поверхностью, а с внутренней стороны — цилиндрической поверхностью диаметром $D_{ц}$. При этом ось симметрии фрагмента проходит через геометрический центр исходной сферической заготовки и образуется динамическая ось ротора O_1O_1 .

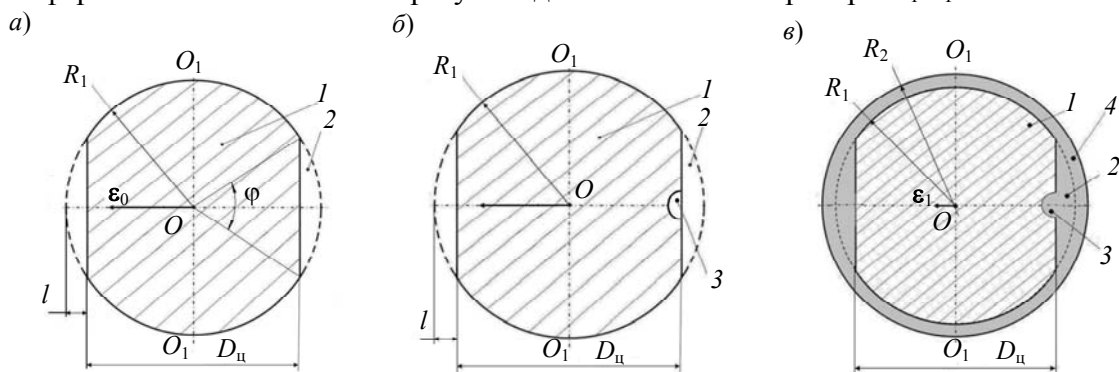


Рис. 1

Кроме того, определяют вектор дисбаланса ϵ_0 исходной сферической заготовки, и кольцевой фрагмент ориентируют своей осью симметрии, совпадающей с осью O_1O_1 , перпендикулярно этому вектору (см. рис. 1, а), что обуславливает расположение вектора ϵ_0 в экваториальной плоскости заготовки. В данном случае при расчетах можно принять допущение, что при формировании заготовки посредством съема кольцевого фрагмента величина и направление вектора дисбаланса ϵ_0 не меняются. С учетом анизотропии свойств углеситалла величина дисбаланса может составлять десятки микрометров, даже при выполнении заготовки с высокой точностью. Далее, используя известные технические решения по корректировке дисбаланса сферических роторов [11—13], осуществляют балансировку заготовки посредством формирования на ее цилиндрической поверхности локальной выемки 3 (рис. 1, б), при этом удаляется расчетная масса материала (углеситалл), определяемая из условия, что при последующем заполнении этой выемки корректирующей точечной массой ниобия дисбаланс ϵ_1 заготовки 1 будет минимизирован (рис. 1, в).

Так как ниобий имеет более высокую плотность, чем углеситалл, выемку 3 необходимо делать со стороны, противоположной направлению вектора дисбаланса ϵ_0 , а ось выемки располагать в экваториальной плоскости ротора. Это определяет размещение выемки 3 в позиции, где толщина покрытия 4 максимальна (см. рис. 1, в), что минимизирует возможное влияние выемки на условия функционирования ротора и позволяет при нанесении покрытия 4 учитывать только припуск на финишную балансировку ротора. Таким образом, получают заготовку ротора, которая, при заполнении выемки материалом покрытия, имеет минимальный дисбаланс ϵ_0 , определяемый только погрешностью процесса формообразования выемки.

Далее на поверхности полученной заготовки ротора формируют покрытие, например, электролитическим методом [6], учитывая необходимый припуск на финишную обработку ротора, которая заключается в механической доводке для обеспечения требуемой несферичности и электрохимической полировке с последующим отжигом для восстановления сверхпроводящих свойств.

Очевидно, что приведенные технологические схемы по формированию моментов инерции ротора КГ и корректировке дисбаланса заготовки ротора должны быть описаны математическими зависимостями, связывающими формируемые функциональные параметры ротора и условия его обработки.

Учитывая аддитивность момента инерции и используя известные выражения для моментов инерции [14, 15] ротора КГ, показанного на рис. 1, в, можно определить выражения для моментов инерции вдоль (I_{so}) и поперек (I_{se}) оси вращения ротора (не учитывая, вследствие незначительного влияния, точечную корректирующую массу), а также представить зависимость относительной разности моментов инерции $\delta I = \frac{I_{so} - I_{se}}{I_{so}}$, которая является одним из

основных функциональных параметров ротора и определяется выражением

$$\delta I = \frac{(\rho_2 - \rho_1)\pi R_1^5 \left[\frac{1}{2} \cos^2(\varphi/2) \sin(\varphi/2) + \frac{1}{6} \cos^2(\varphi/2) \sin^3(\varphi/2) \right]}{\frac{8}{15} \pi \rho_2 R_2^5 - (\rho_2 - \rho_1)\pi R_1^5 \left[\cos^4(\varphi/2) \sin(\varphi/2) + \frac{8}{15} - \sin(\varphi/2) + \frac{2}{3} \sin^3(\varphi/2) - \frac{1}{5} \sin^5(\varphi/2) \right]} + \frac{(\rho_2 - \rho_1)\pi R_1^5 \left[\frac{1}{2} \sin(\varphi/2) - \sin^3(\varphi/2) + \frac{1}{2} \sin^5(\varphi/2) - \cos^4(\varphi/2) \sin(\varphi/2) \right]}{\frac{8}{15} \pi \rho_2 R_2^5 - (\rho_2 - \rho_1)\pi R_1^5 \left[\cos^4(\varphi/2) \sin(\varphi/2) + \frac{8}{15} - \sin(\varphi/2) + \frac{2}{3} \sin^3(\varphi/2) - \frac{1}{5} \sin^5(\varphi/2) \right]}, \quad (1)$$

где ρ_1 — плотность заготовки, ρ_2 — плотность покрытия.

На рис. 2 представлены графические зависимости изменения δI от толщины среза $l = R_1(1 - \cos(\varphi/2))$, или толщины кольцевого фрагмента, для углеситалловой заготовки ($\rho_1 = 1,95 \text{ г/см}^3$) различного диаметра $2R_1$ (9,7, 9,8 и 9,9 мм) и ниобиевого покрытия ($\rho_2 = 8,5 \text{ г/см}^3$) при наружном диаметре ротора $2R_2 = 10 \text{ мм}$.

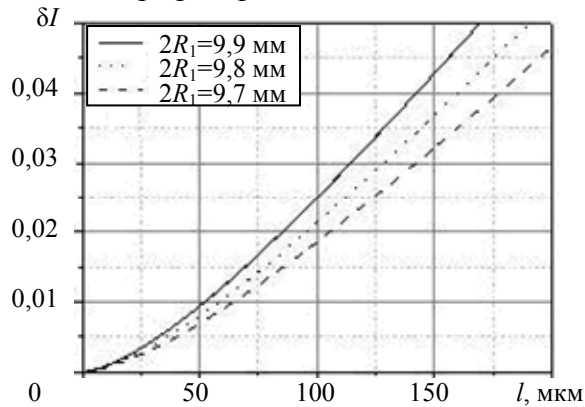


Рис. 2

По отношению к реальному ротору, для которого среднее значение δI лежит в диапазоне 0,01—0,02, приведенные на рис. 2 графики можно использовать для выбора диаметра цилиндра $D_{\text{ц}}$, определяющего геометрию кольцевого фрагмента и, как следствие, величину δI . Для приведенной технологической схемы диаметр $D_{\text{ц}}$ можно определить как значимый параметр процесса формирования моментов инерции ротора.

Процесс балансировки углеситалловой заготовки l ротора КГ (см. рис. 1) связан с определением зависимости величины устраняемого дисбаланса от геометрии заготовки и характеристик используемых материалов. Можно записать, что для вектора дисбаланса ϵ_0 , который, по сути, является вектором центра масс, справедливо общее выражение:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{M} \int_V \rho \mathbf{r} dV, \quad (2)$$

где ρ — плотность материала заготовки в заданной точке с радиус-вектором \mathbf{r} , M и V — масса и объем заготовки ротора.

Область интегрирования выражения (2) можно разбить на две части: по заготовке l ротора с выемкой и непосредственно по выемке объемом δV :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{M} \int_V \rho \mathbf{r} dV = \frac{1}{M} \int_{V-\delta V} \rho_1 \mathbf{r} dV + \frac{1}{M} \int_{\delta V} \rho_1 \mathbf{r} dV. \quad (3)$$

Аналогично, если выемка заполнена материалом ниобиевого покрытия, т.е. выполняет функцию армирующего элемента, имеющего плотность ρ_2 , для конечного дисбаланса ϵ_1 в общем виде можно записать:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{M'} \int_V \rho \mathbf{r} dV = \frac{1}{M'} \int_{V-\delta V} \rho_1 \mathbf{r} dV + \frac{1}{M'} \int_{\delta V} \rho_2 \mathbf{r} dV, \quad (4)$$

где M' — масса заготовки l с выемкой δ , заполненной материалом покрытия.

Вычитая из (4) выражение (3) и пренебрегая различием масс M и M' , получаем величину изменения дисбаланса $\Delta \epsilon$:

$$\Delta \epsilon = \epsilon_0 - \epsilon_1 = \frac{1}{M} \int_{\delta V} (\rho_2 - \rho_1) \mathbf{r} dV,$$

откуда можно получить зависимость, определяющую массу удаляемого из выемки материала

$$m = \frac{2M\rho_1\Delta\epsilon}{D_{\text{ц}}(\rho_2 - \rho_1)},$$

а определяя полное устранение дисбаланса ϵ_0 , т.е. задавая $\epsilon_1=0$, или $|\Delta\epsilon|=|\epsilon_0|$, можно привести выражение для удаляемой массы m к виду

$$m = \frac{2M\rho_1\epsilon_0}{D_{\text{ц}}(\rho_2 - \rho_1)}.$$

В данном случае для получения достоверного результата можно считать выемку 3 точечной и оперировать в расчетах массой m удаляемого материала.

Конфигурация выемки принципиального значения не имеет, поскольку расчеты сводятся к определению массы удаляемого материала. Выемка может быть и полусферической, и цилиндрической, и конусной, что обусловлено способом ее выполнения, из которых наиболее эффективным можно считать лазерную обработку [13], широко используемую для решения ряда прикладных задач [16, 17].

Реальные величины дисбаланса, который необходимо корректировать, составляют от 10 до 25 мкм. Из этого следует преимущественное значение процесса корректировки дисбаланса, поскольку составляющие исходного дисбаланса, которые определяются точностью выполнения цилиндра диаметром $D_{\text{ц}}$ на углеситалловой заготовке, будут значительно меньше.

На рис. 3 показаны зависимости, определяющие влияние удаляемой массы m на изменение дисбаланса $\Delta\epsilon$ ротора при различных значениях $2R_1$, $2R_2=10$ мм и $l=0,1$ мм. Представленные зависимости практически не отличаются. Видно, что для корректировки дисбаланса порядка единиц микрометра контролируемая при балансировке заготовки ротора удаляемая масса углеситалла составляет от десятых долей до единиц миллиграмма. Соответственно корректирующая масса (ниобия, заполняющего выемку) будет больше в 4,36 раза.

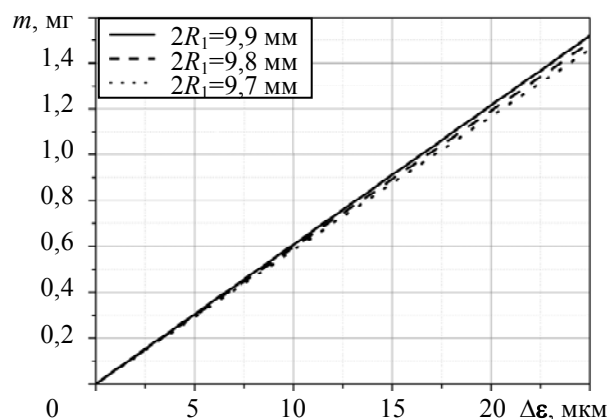


Рис. 3

Определяя конфигурацию выемки 3, например, как полусферическую (см. рис. 1, а), можно показать, что при $\Delta\epsilon=10$ мкм удаляемая масса m составляет $\sim 0,6$ мг, что соответствует радиусу выемки $r_{\text{в}} \approx 0,12$ мм, для $\Delta\epsilon=20$ мкм $m \approx 1,2$ мг и $r_{\text{в}} \approx 0,15$ мм. Таким образом, масса m удаляемого материала является значимым фактором управления процессом балансировки ротора.

Существенное значение имеет и оценка изменения многослойной конструкции ротора — средней плотности $\rho_{\text{ср}}$ при различных значениях l или ϕ , поскольку при контроле дисбаланса ротора в жидкости важным условием для получения достоверных результатов является максимальное приближение процесса измерения к состоянию так называемой нулевой или нейтральной плавучести, когда плотность $\rho_{\text{ср}}$ незначительно превышает плотность жидкости. Очевидно, что отрицательная плавучесть (плотность ротора выше плотности жидкости) является в принципе неприемлемой. Для расчета параметров балансировки можно привести выражение, позволяющее определить зависимость средней плотности $\rho_{\text{ср}}$ от параметров заготовки:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{4/3R_2^3\rho_2 - (\rho_2 - \rho_1)R_1^3 \left[2\cos^2(\varphi/2)\sin(\varphi/2) + \frac{2}{3}(1 - \sin(\varphi/2))^2(2 + \sin(\varphi/2)) \right]}{\frac{4}{3}R_2^3}$$

С этой точки зрения представляет практический интерес зависимость $\rho_{\text{ср}}(\varphi)$ при различных значениях $2R_1$ и $2R_2=10$ мм (рис. 4). На практике угол φ составляет величину порядка 30° , однако для различных перспективных модификаций роторов, например, с другими требованиями к относительной разности моментов инерции, угол φ может быть и больше, и меньше 30° , поэтому в данном случае рассматривается диапазон от 0 до 70° .

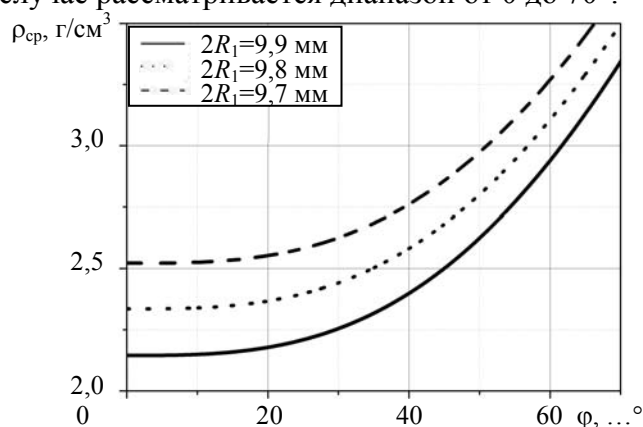


Рис. 4

Как показывает анализ рис. 4, дополнительным управляющим фактором процесса изготовления ротора с требуемой средней плотностью $\rho_{\text{ср}}$ может быть выбор величины R_1 при заданных значениях R_2 и φ , что определяет толщину $R_2 - R_1$ слоя ниобия, не влияющего на моменты инерции. Например, при $\varphi=30^\circ$ значение $\rho_{\text{ср}}$ может изменяться от $\sim 2,3$ до $\sim 2,65$ г/см³, что за счет согласования плотностей ротора и жидкости для балансировки позволяет улучшить условия контроля дисбаланса ротора и повысить точность измерения.

Итак, в составе ротора используются только два материала — основа из углеситалла и сверхпроводящее покрытие, при этом поскольку распределение материала ниобиевого покрытия по поверхности ротора обеспечивает создание моментов инерции, технология изготовления ротора в целом упрощается. Кроме того, устанавливается управляемая взаимосвязь технологических операций по формированию моментов инерции и балансировке ротора.

Представленные математические модели позволяют на основе полученных аналитических зависимостей и выявленных значимых факторов определять геометрические параметры заготовки и условия процесса корректировки ее дисбаланса, что расширяет технологические возможности и позволяет управлять процессом изготовления роторов криогенного гироскопа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин С. Л., Святой В. В., Степченко М. В и др. Результаты разработки конструкции и технологии изготовления элементов криогироскопа // Материалы XXX конф. памяти Н. Н. Острякова. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2016. С. 99—106.
2. Poole Ch. P., Farach H. A., Creswick R. J., Prozorov R. Superconductivity. Amsterdam: Elsevier Science, 2014. 870 p.
3. Bishop D. J. Superconductivity: Applications // Encyclopedia of Condensed Matter Physics. 2005. P. 66—72.
4. Kahn R., Everitt F., Muhlfelder B., Langenstein T. Gravity Probe B: Science results // NASA Final Report. 2008. 84 p.
5. Everitt C. W. F. et al. Gravity Probe B: Final results of a space experiment to test general relativity // Phys. Rev. Lett. 2011. N 106. P. 221101.

6. Махаев Е. А., Рябова Л. П., Чесноков П. А. Разработка конструкции и технологии изготовления ротора криогирокопа // Материалы XXX конф. памяти Н. Н. Острякова. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2016. С. 116—123.
7. Юльметова О. С., Щербак А. Г. Моделирование процесса формирования моментов инерции роторов шаровых гироскопов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. № 4. С. 677—685.
8. Щербак А. Г., Кедров В. Г. Технология прецизионной диффузионной сварки в точном приборостроении. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 1996. 166 с.
9. Пат. 228653 РФ. Способ изготовления ротора шарового гироскопа / Б. Е. Ландау, С. Н. Беляев, А. П. Буравлев и др. Опубл. 27.10. 2006. Бюл. № 30.
10. Дубровский А. Р., Окунев М. А., Макарова О. В. и др. Исследование коррозионной устойчивости подложек роторов криогенного гироскопа в ниобийсодержащем расплаве // Тр. Кольского научного центра РАН. 2015. № 5 (31). С. 227—231.
11. Юльметова О. С., Щербак А. Г., Туманова М. А. Исследование процесса корректировки дисбаланса сферического ротора на стадии напыления тонкопленочного покрытия // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. № 6. С. 1045—1051.
12. Пат. 2592748 РФ. Способ изготовления ротора электростатического гироскопа / О. С. Юльметова, А. Г. Щербак, А. Ю. Филиппов и др. Опубл. 27.07.2016. Бюл. № 21.
13. Пат. 2638870 РФ. Способ изготовления ротора электростатического гироскопа и устройство для осуществления этого способа / О. С. Юльметова, А. Г. Щербак, А. М. Фомичев и др. Опубл. 18.12.2017. Бюл. № 35.
14. Фаворин М. В. Моменты инерции тел: Справочник. М.: Машиностроение, 1970. 312 с.
15. Ram H. D., Chauhan A. K. Foundations and Applications of Engineering Mechanics. Cambridge Univ. Press, 2015. 646 p.
16. Yulmetova O. S., Scherbak A. G. Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optoelectronic read-out system // Optics and Laser Technology. 2018. Vol. 101. P. 242—247.
17. Yulmetova O. S., Scherbak A. G. Composition analysis of thin films formed on beryllium surfaces under pulsed laser action by the method of chemical thermodynamics // Intern. Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 97, N 9—12. P. 3231—3236.

Сведения об авторах

- Ольга Сергеевна Юльметова** — канд. техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“; ст. научный сотрудник;
E-mail: olga@yulmetova.ru
- Александр Григорьевич Щербак** — д-р техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“; вед. научный сотрудник;
E-mail: a_sch@gtn.ru
- Рафия Фагимовна Юльметова** — канд. хим. наук, доцент; Университет ИТМО; E-mail: liya974@mail.ru

Поступила в редакцию
11.10.18 г.

Ссылка для цитирования: Юльметова О. С., Щербак А. Г., Юльметова Р. Ф. Технология формирования моментов инерции сферических роторов из анизотропных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 3. С. 218—225.

TECHNOLOGY OF FORMATION OF INERTIA MOMENTS OF SPHERICAL ROTORS FROM ANISOTROPIC MATERIALS

O. S. Yulmetova^{1,2}, A. G. Shcherbak¹, R. F. Yulmetova²

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

²ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

Technological methods used for formation of the functional parameters, like moment of inertia and imbalance of cryogenic gyroscope rotor, are considered. As the material of the rotor, it was proposed to use a carbon-metal nanocomposite well combined in physical and chemical properties with niobium, but

demonstrating a strong anisotropy of properties, which brings to the appearance of an imbalance. The performed research was aimed at revealing technical solutions for formation of moments of inertia and correction of imbalance caused by the anisotropy of the rotor substrate material. The proposed complex is a qualitatively new technological methods and means of manufacture of the rotor of a cryogenic gyroscope associated with the coordinated operations of the formation of the rotor workpiece of pyroboroncarbon and application of superconducting niobium coating. The developed technology was patented and used for the manufacture of an experimental rotor of a cryogenic gyroscope.

Keywords: anisotropic material, niobium, rotor, cryogenic gyroscope, imbalance

REFERENCES

1. Levin S.L., Svyatyy V.V., Stepchenko M.V et al. *Materialy XXX Konferentsii pamyati N.N. Ostryakova* (Proceedings of the XXX memory Conference N.N. Ostryakova), 04–06 October 2016, St. Petersburg, 2016, pp. 99–106. (in Russ.)
2. Poole Ch.P., Farach H.A., Creswick R.J. and Prozorov R. *Superconductivity*, Amsterdam, Elsevier Science, 2014, 870 p.
3. Bishop D.J. *Superconductivity: Applications in Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, 2005, pp. 66–72.
4. Kahn R., Everitt F., Muhlfelder B., Langenstein T. *Gravity Probe B Science Results*, NASA Final Report, 2008, 84 p.
5. Everitt C.W.F. et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, no. 106, pp. 221101.
6. Makhayev E.A., Ryabova L.P., Chesnokov P.A. *Materialy XXX Konferentsii pamyati N.N. Ostryakova XXX* (Proceedings of the XXX memory Conference N. N. Ostryakova), 04–06 October 2016, St. Petersburg, 2016, pp. 116–123. (in Russ.)
7. Yulmetova O.S., Scherbak A.G. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, no. 4, pp. 677–685 (in Russ.)
8. Shcherbak A.G., Kedrov V.G. *Tekhnologiya pretsizionnoy diffuzionnoy svarki v tochnom priborostroyenii* (Technology of Precision Diffusion Welding in Precision Instrument Making), St. Petersburg, 1996, 166 p. (in Russ.)
9. Patent RU 228653, *Sposob izgotovleniya rotora sharovogo giroskopa* (A Method of Manufacturing a Ball Gyro Rotor), B.Ye. Landau, S.N. Belyayev, A.P. Buravlev et al. Published 27.10. 2006. Bulletin 30. (in Russ.)
10. Dubrovskii A.R., Okunev M.A., Makarova O.V., Makhaev E.A., Svyatyy V.V., Kuznetsov S.A. *Materials of the Kola Science Center of the RAS*, 2015, no. 5(3), pp. 227–231. (in Russ.)
11. Yulmetova O.S., Shcherbak A.G., Tumanova M.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, no. 6, pp. 1045–1051. (in Russ.)
12. Patent RU 2592748, *Sposob izgotovleniya rotora elektrosticheskogo giroskopa* (A Method of Manufacturing a Rotor of an Electrostatic Gyroscope), O.S. Yulmetova, A.G. Shcherbak, A.Yu. Filippov et al. Published 27.07.2016, Bulletin 21. (in Russ.)
13. Patent RU 2638870, *Sposob izgotovleniya rotora elektrosticheskogo giroskopa i ustroystvo dlya osushchestvleniya etogo sposoba* (A Method for Manufacturing the Electrostatic Gyroscope Rotor and a Device for Implementing This Method), O.S. Yulmetova, A.G. Shcherbak, A.M. Fomichev et al., Published 18.12.2017, Bulletin 35. (in Russ.)
14. Favorin M.V. *Momenty inertsii tel. Spravochnik* (Moments of Inertia Bodies. Handbook), Moscow, 1970, 312 p. (in Russ.)
15. Ram H.D., Chauhan A.K. *Foundations and Applications of Engineering Mechanics*, Cambridge University Press, 2015, 646 p.
16. Yulmetova O.S., Scherbak A.G. *Optics and laser technology*, 2018, no. 101, pp. 242–247.
17. Yulmetova O.S., Scherbak A.G. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, no. 9-12(97), pp. 3231–3236.

Data on authors

- Olga S. Yulmetova** — PhD; Concern CSRI Elektropribor, JSC; Senior Researcher;
E-mail: olga@yulmetova.ru
- Aleksander G. Shcherbak** — Dr. Sci.; Concern CSRI Elektropribor, JSC; Leading Researcher;
E-mail: a_sch@gtn.ru
- Raliya F. Yulmetova** — PhD, Associate Professor; ITMO University; E-mail: liya974@mail.ru

For citation: Yulmetova O. S., Shcherbak A. G., Yulmetova R. F. Technology of formation of inertia moments of spherical rotors from anisotropic materials. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 3. P. 218–225 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-3-218-225