



УДК 535.8

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ РОТОРОВ ДВУХСТЕПЕННЫХ ПОПЛАВКОВЫХ ГИРОСКОПОВ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА

А.В. Старцева, Б.Л. Шарыгин, Е.Г. Литуненко

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация
Адрес для переписки: sav2405@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 15.01.19, принята к печати 18.02.19

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-247-254

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Старцева А.В., Шарыгин Б.Л., Литуненко Е.Г. Исследование микроструктуры роторов двухступенных поплавковых гироскопов с помощью сканирующего электронного микроскопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 247–254. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-247-254

Аннотация

Предмет исследования. Надежность работы инерциальных навигационных систем напрямую зависит от надежности работы роторов. Предложена методика входного контроля роторов двухступенных поплавковых гироскопов, входящих в состав двухсот таких систем, находящихся в эксплуатации. **Метод.** Разработанная методика основана на определении состава сплава Ю10Н15 для роторов двухступенных поплавковых гироскопов, его однородности по основным химическим элементам, а также на оценке качества поверхности роторов. В основе методики лежат методы сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа для получения исходных данных и их дальнейшей обработки методом однофакторного дисперсионного анализа с целью определения гомогенности состава. **Основные результаты.** В результате исследований выявлено различие химического состава сплава роторов по основным и легирующим элементам, зафиксирована разница топологии поверхности образцов, изготовленных по одной технологии, определены включения примесных элементов с размерами от нескольких единиц микрометров и химическим составом, радикально отличающимся от общего состава сплава. **Практическая значимость.** Использование методики позволяет выявить несоответствие химического состава сплава техническим требованиям, наличие нежелательных примесей и включений, неомогенность состава сплава и микродефектов поверхности, а следовательно, снизить вероятность отказа роторов.

Ключевые слова

ротор двухступенного поплавкового гироскопа, растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, гомогенность сплава, однофакторный дисперсионный анализ

MICROSTRUCTURE RESEARCH OF FLOAT-TYPE GYRO ROTORS BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPE

A.V. Startseva, B.L. Sharygin, E.G. Litunencko

Concern CSRI Electropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

Corresponding author: sav2405@gmail.com

Article info

Received 15.01.19, accepted 18.02.19

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-247-254

Article in Russian

For citation: Startseva A.V., Sharygin B.L., Litunencko E.G. Microstructure research of float-type gyro rotors by scanning electron microscope. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 247–254 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-247-254

Abstract

Subject of Research. The methods are proposed for input control of the float-type gyro rotors, which are part of more than two hundred inertial navigation systems currently being in operation. The reliability of these systems depends directly on the reliability of the rotors. The deterioration in the quality of materials supplied and the increased frequency of technological discipline violations in recent years have led to an increase in the number of gyro corrupted during their production, associated with the jamming of the gyro-motor. **Method.** The developed methods of the rotor input control is based on the determination of the Al-Ni alloy composition for float-type gyro rotors, its homogeneity by the basic chemical elements and the evaluation of the surface quality of the rotors. The developed methods are based on the scanning electron microscopy

application and electron probe microanalyses for obtaining initial data and further processing by single-factor analysis of variance to determine the homogeneity of the composition. **Main Results.** As a result of the research, the variance of the alloy chemical composition of the researched rotors was revealed by basic and alloying elements, the surface topology of samples manufactured using the same technology was differentiated, impurity elements with dimensions from several micrometers and radically different chemical composition from the total alloy composition were determined. **Practical Relevance.** The developed method made it possible to identify the probable causes of the rotor descent caused by the non-compliance of the alloy chemical composition with technical requirements, the presence of undesirable impurities and inclusions, non-homogeneity of the alloy composition and micro-defects of the rotor surface.

Keywords

float-type gyro rotor, raster electronic microscope, electron probe microanalyses, alloy homogeneity, single-factor dispersion analysis

Введение

Двухступенной поплавокый гироскоп (ДПГ) – серийное изделие, которое является информационным элементом систем инерциальной навигации и стабилизации [1]. Надежность работы этих систем во многом определяется качеством изготовления ДПГ. Снижение качества традиционных материалов и участвовавшие случаи нарушения технологической дисциплины начали приводить к увеличению брака при производстве ДПГ, связанного с заклиниванием гироскопа, основным конструктивным элементом которого является ротор.

Надежность работы любого изделия во многом зависит от эффективности входного контроля качества применяемых материалов. Для классического роторного гироскопа типа ДПГ важны контроль химического состава сплава, из которого изготавливаются роторы, и контроль состояния поверхности после завершения механической обработки заготовок.

Для определения причин отказов ДПГ, как правило, применяются оптический металлографический анализ, механические испытания и измерения шероховатости поверхности. Однако возможность исследования структуры сплава при высоком разрешении с проведением локального элементного анализа делают электронно-микроскопические исследования [2] востребованными в задачах контроля качества элементов ДПГ. Так, в работе [3] методами сканирующей электронной микроскопии установлены возможные причины отказов гироскопов с газодинамическими опорами ротора.

Состав никель-алюминиевого сплава АЛНИ, из которого изготавливаются роторы ДПГ, и его однородность могут напрямую влиять на магнитные характеристики изделия [4, 5], однако анализ литературных данных показал отсутствие современных работ, в которых были бы представлены результаты исследований химического состава и однородности химических и физических свойств АЛНИ. В связи с этим исследование состава сплава, его однородности (гомогенности) по основным элементам и разработка методики входного контроля роторов является актуальной задачей.

Целью настоящей работы является разработка методики входного контроля заготовок роторов ДПГ, включающей в себя определение химического состава сплава роторов ДПГ, его однородности по основным химическим элементам и определение качества поверхности роторов. Для получения исходных данных и их дальнейшей обработки методом однофакторного дисперсионного анализа (ОДА) с целью определения гомогенности состава используются методы сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА).

Методика входного контроля роторов на основе СЭМ и РСМА

В настоящей работе использовался микроскоп с катодом с полевой эмиссией и тремя детекторами, позволяющими обнаруживать сигналы вторичных и отраженных электронов и рентгеновское излучение. Рентгеноспектральный анализ проводился с использованием энергодисперсионного детектора [6].

Предлагаемая методика включает три этапа: определение соответствия состава сплава техническим требованиям, определение гомогенности состава сплава по основным элементам и исследование топографии поверхности. Перед каждым этапом исследований образцы проходили предварительную подготовку – промывку в спирте и деионизованной воде и сушку.

Определение соответствия состава сплава техническим требованиям

Определение соответствия состава сплава техническим требованиям осуществлялось путем измерения спектра в шести областях (три с одной стороны ротора и три с другой), каждая размером 500×500 мкм. Поверхность измерения спектров показана на рис. 1. Типичный спектр РСМА ротора ДПГ приведен на рис. 2. Содержание элементов в сплаве рассчитывалось по среднему результату из этих шести измерений. Далее полученные данные сравнивались с техническими требованиями.

Роторы ДПГ изготавливаются из сплава типа АЛНИ Ю10Н15. Сплав Ю10Н15 состоит из никеля Ni (14,5–15,5 %), алюминия Al (9,5–10 %), хрома Cr (0,2–0,5 %), церия Ce (0,05–0,1 %),

ванадия V (1,3–1,5 %) и железа Fe. Каждый компонент может включать различные примеси, содержание которых регламентируется ГОСТ¹.

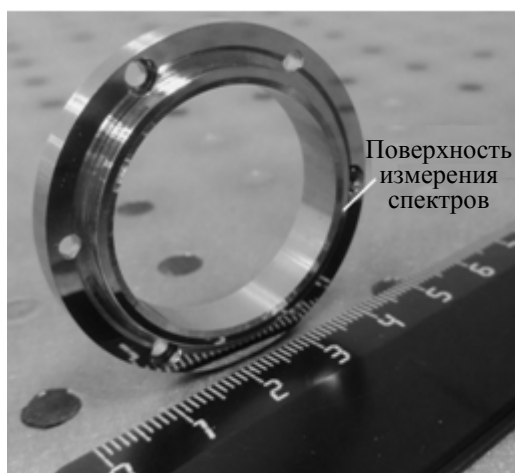


Рис. 1. Поверхность измерения спектров

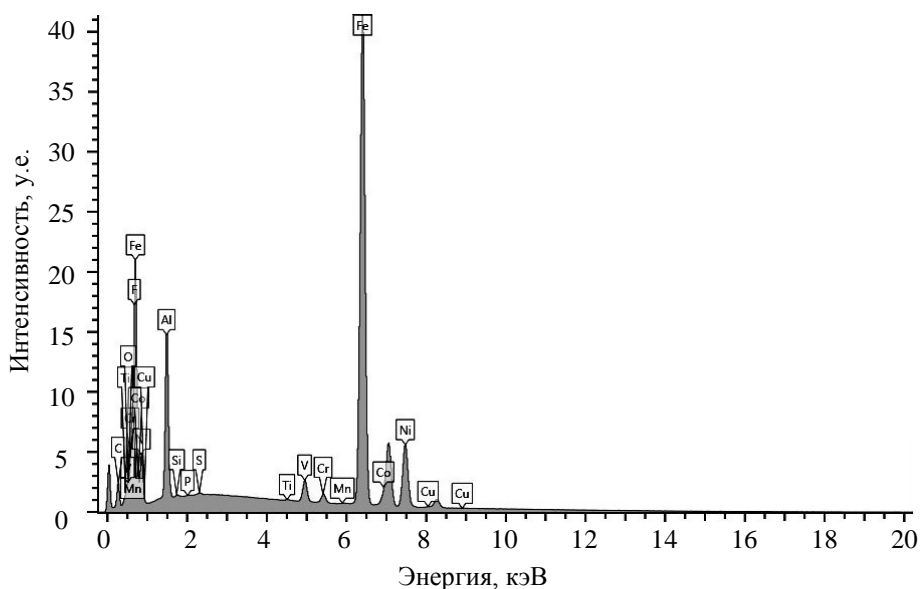


Рис. 2. Типичный спектр РСМА для сплава Ю10Н15

На основании указанных ГОСТ определены допустимые примеси и их количество в сплаве. Суммарный процент примеси в сплаве должен рассчитываться с учетом доли шихтового материала для плавки.

На 29 роторах из отказавших ДПГ исследовано соответствие состава сплава техническим требованиям по основным элементам: Ni, Al, Cr, Se и V. По Ni, Al, Cr и V техническим требованиям соответствует не более 25 % роторов. Ни в одном из образцов методом РСМА не обнаружено присутствие Se, так как его количество в сплаве находится на границе чувствительности метода в 0,1 % масс. Однако на основе полученных данных можно утверждать, что количество Se в сплаве не превышает 0,1 %.

В исследуемых образцах методом РСМА помимо основных элементов были определены примесные элементы и их количество. Все образцы имеют примеси фтора (F), кремния (Si), серы (S),

¹ ГОСТ 11036-75 Сталь сортовая электротехническая нелегированная. Технические условия. Введен. 01.01.1977. М.: Издательство стандартов, 1975. 5 с.

ГОСТ 849-97. Никель первичный. Технические условия. Введен. 01.07.1998. М.: Стандартинформ, 1999. 11 с.

ГОСТ 4784-97 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. Введен. 01.07.2000. М.: Стандартинформ, 2009. 21 с.

ГОСТ 5905-2004 Хром металлический. Технические требования и условия поставки. Введен. 01.07.2005. М.: Стандартинформ, 2006. 11 с.

ГОСТ 27130-94 Феррованадий. Технические требования и условия поставки. Введен. 01.01.1996. М.: Издательство стандартов, 1995. 10 с.

ГОСТ 127.1-93 Сера техническая. Технические условия. Введен. 01.01.1997. М.: Издательство стандартов, 1996. 10 с.

титана (Ti), кобальта (Co), марганца (Mn), меди (Cu). Согласно техническим требованиям, F и Co в составе Ю10Н15 быть не должно. Сера является вредной примесью и может негативно влиять на надежностные характеристики роторов. Что касается остальных примесей, то их наличие и количество удовлетворяет требованиям, представленным в табл. 1.

Таблица 1. Содержание примесей в шихтовых материалах для плавки Ю10Н15 согласно ГОСТ, %

| Материал | Тип примеси | | | | | | |
|--|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| | S | C | Mn | Si | P | Cu | Ti |
| Сталь сортовая электротехническая нелегированная | – | 0,035 | 0,3 | 0,3 | 0,02 | 0,3 | – |
| Никель | 0,001 | 0,01 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,02 | 0,01 |
| Алюминий | – | – | – | 0,15 | – | 0,01 | 0,01 |
| Хром | 0,02 | 0,03 | – | 0,2 | 0,02 | 0,02 | – |
| Феррованадий | 0,1 | 1 | 1 | 2 | 0,1 | 0,2 | – |
| Сера техническая природная | – | 0,03 | 0,001 | – | – | 0,001 | – |

Определение гомогенности состава сплава по основным элементам методом однофакторного дисперсионного анализа

Для проверки гомогенности сплава [7] ротора использован метод ОДА – анализ изменчивости признака под влиянием каких-либо контролируемых переменных факторов [8, 9]. Признаком будет являться процентное содержание химических элементов сплава Ni, Al, V и Cr в областях измерения спектра. Для проведения ОДА спектр снимался на поверхности, показанной на рис. 1. Области разнесены по окружности на 120°. В каждой области проводилось по 20 измерений. В качестве примера в табл. 2 представлены исходные данные по процентному содержанию никеля в сплаве для одного из роторов.

Таблица 2. Определение содержания Ni в сплаве в нескольких областях ротора, %

| Измерение | Область 1 | Область 2 | Область 3 | Область 4 | Область 5 | Область 6 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 14,53 | 14,57 | 14,52 | 14,46 | 14,49 | 14,62 |
| 2 | 14,53 | 14,63 | 14,49 | 14,43 | 14,55 | 14,41 |
| 3 | 14,46 | 14,56 | 14,51 | 14,50 | 14,44 | 14,49 |
| 4 | 14,51 | 14,59 | 14,50 | 14,48 | 14,52 | 14,53 |
| 5 | 14,58 | 14,60 | 14,49 | 14,57 | 14,49 | 14,58 |
| 6 | 14,48 | 14,61 | 14,49 | 14,42 | 14,47 | 14,53 |
| 7 | 14,53 | 14,58 | 14,51 | 14,52 | 14,49 | 14,45 |
| 8 | 14,57 | 14,55 | 14,57 | 14,44 | 14,53 | 14,48 |
| 9 | 14,52 | 14,56 | 14,49 | 14,46 | 14,49 | 14,52 |
| 10 | 14,56 | 14,57 | 14,55 | 14,48 | 14,43 | 14,56 |
| 11 | 14,54 | 14,55 | 14,59 | 14,51 | 14,55 | 14,51 |
| 12 | 14,57 | 14,50 | 14,48 | 14,49 | 14,53 | 14,51 |
| 13 | 14,49 | 14,51 | 14,48 | 14,45 | 14,52 | 14,54 |
| 14 | 14,49 | 14,55 | 14,52 | 14,49 | 14,54 | 14,54 |
| 15 | 14,51 | 14,60 | 14,54 | 14,44 | 14,54 | 14,57 |
| 16 | 14,56 | 14,54 | 14,53 | 14,43 | 14,48 | 14,41 |
| 17 | 14,55 | 14,51 | 14,54 | 14,49 | 14,48 | 14,59 |
| 18 | 14,49 | 14,60 | 14,49 | 14,49 | 14,48 | 14,51 |
| 19 | 14,55 | 14,56 | 14,41 | 14,50 | 14,54 | 14,58 |
| 20 | 14,50 | 14,61 | 14,53 | 14,49 | 14,41 | 14,60 |

Данные табл. 2 обрабатывались с помощью программного обеспечения Microsoft Excel с использованием автоматического пакета анализа с опцией ОДА. В табл. 3 и 4 приведены итоги ОДА. В табл. 3 представлены средние значения и дисперсия по шести областям измерений. В табл. 4 приведены: полная дисперсия SS ; степени свободы df ; внутригрупповая (остаточная) дисперсия MS ; критерий отношения оценок межгрупповой и внутригрупповой дисперсий F ; уровень значимости P (обычно 0,05); $F_{кр}$ – пороговое значение F критерия для принятия решения о нулевой гипотезе.

Таблица 3. Средние значения и дисперсии по шести областям измерений Ni в составе сплава

| Группы | Счет | Сумма | Среднее | Дисперсия |
|-----------|------|--------|---------|-----------|
| Область 1 | 20 | 290,52 | 14,53 | 0,0012 |
| Область 2 | 20 | 291,35 | 14,57 | 0,0013 |
| Область 3 | 20 | 290,23 | 14,51 | 0,0015 |
| Область 4 | 20 | 289,54 | 14,48 | 0,0013 |
| Область 5 | 20 | 289,97 | 14,50 | 0,0017 |
| Область 6 | 20 | 290,53 | 14,53 | 0,0034 |

Таблица 4. Результаты ОДА распределения Ni в образце

| Источник вариации | <i>SS</i> | <i>df</i> | <i>MS</i> | <i>F</i> | <i>P</i> | $F_{кр}$ |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------------|----------|
| Между группами | 0,09 | 5 | 0,02 | 10,91 | $1,36 \cdot 10^{-8}$ | 2,29 |
| Внутри групп | 0,20 | 114 | 0,002 | | | |
| Итого | 0,29 | 119 | | | | |

Так как $F > F_{кр}$, а $P \ll 0,05$, то принимается гипотеза о влиянии исследуемого фактора (область измерения) на процентное содержание никеля, таким образом, распределение никеля в сплаве исследованного ротора носит неоднородный характер.

Для рассматриваемого образца также был проведен однофакторный дисперсионный анализ распределения Al, V и Cr. Условие гомогенности удовлетворяет только распределение Cr.

По результатам анализа состава сплава только у двух из семи роторов распределение основных элементов в сплаве носит гомогенный характер.

Однофакторный дисперсионный анализ можно применить и для определения характера распределения основных элементов сплава в партии. В настоящей работе исследован состав трех роторов из одной партии. Однофакторный дисперсионный анализ показал, что распределение основных элементов в роторах из этой партии также негомогенно.

Исследование топографии поверхности роторов ДПГ

Исследование топографии поверхности роторов с помощью методов растровой электронной микроскопии показало существенные различия в качестве их обработки (рис. 3, а, б). Согласно техническим требованиям, среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины не должно превышать 0,63 мкм. Количество дефектов площадью меньше 3 мм² не лимитируется.

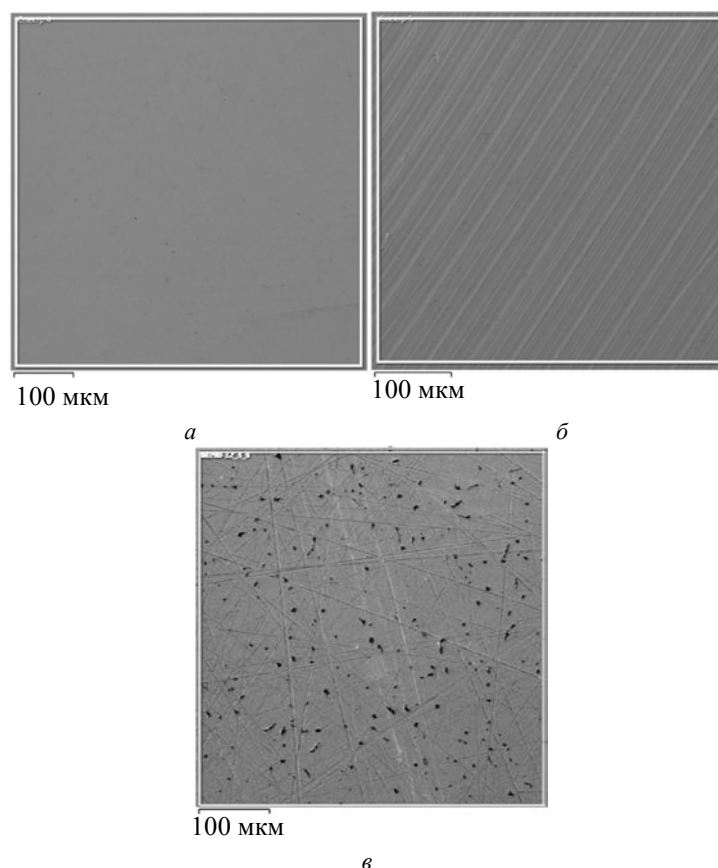


Рис. 3. Различия качества обработки поверхности на разных образцах:
 а – низкая шероховатость поверхности, б – высокая шероховатость поверхности,
 в – множественные включения примесей на поверхности образцов

На поверхности некоторых роторов было обнаружено большое количество включений черного или темно-серого цвета (рис. 3, в).

Для изучения элементного состава обнаруженных включений была проведена операция картирования: построена карта распределения того или иного химического элемента на выбранном

участке образца. Если наложить карты распределения химических элементов на изображение микроструктуры поверхности образца и проанализировать их, можно сделать вывод, что основными элементами, формирующими включение, показанное на рис. 4, являются Mn, S и Al, а основными элементами, формирующими включение, представленное на рис. 5, являются Ti, S и V. Сигналов от других химических элементов, например, Ni или Fe, из области дефекта не поступает.

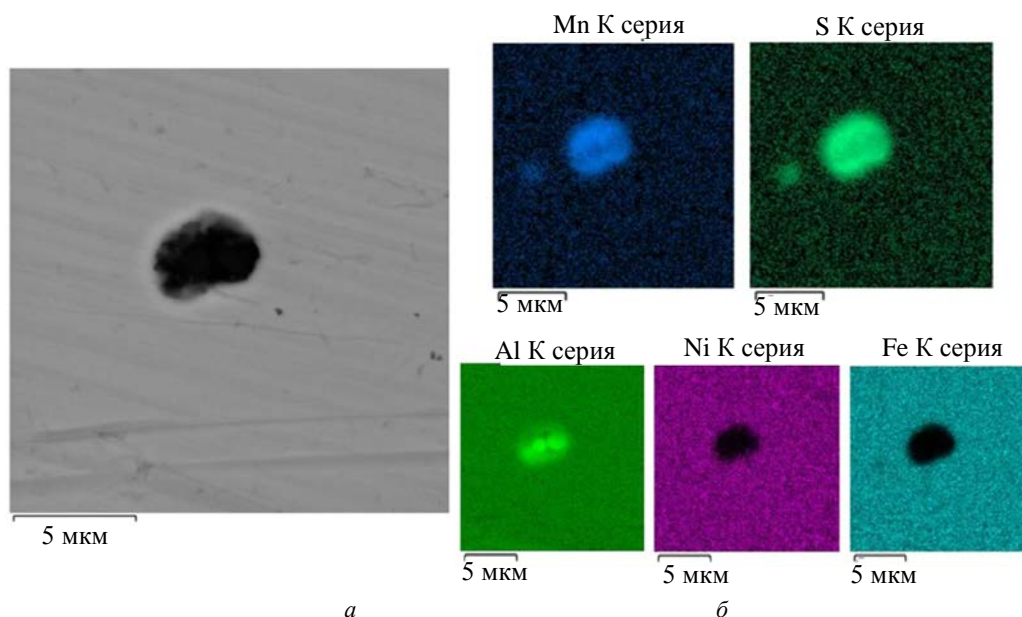


Рис. 4. Включение Mn и S: *a* – изображение включения на поверхности образца; *б* – карты элементного состава

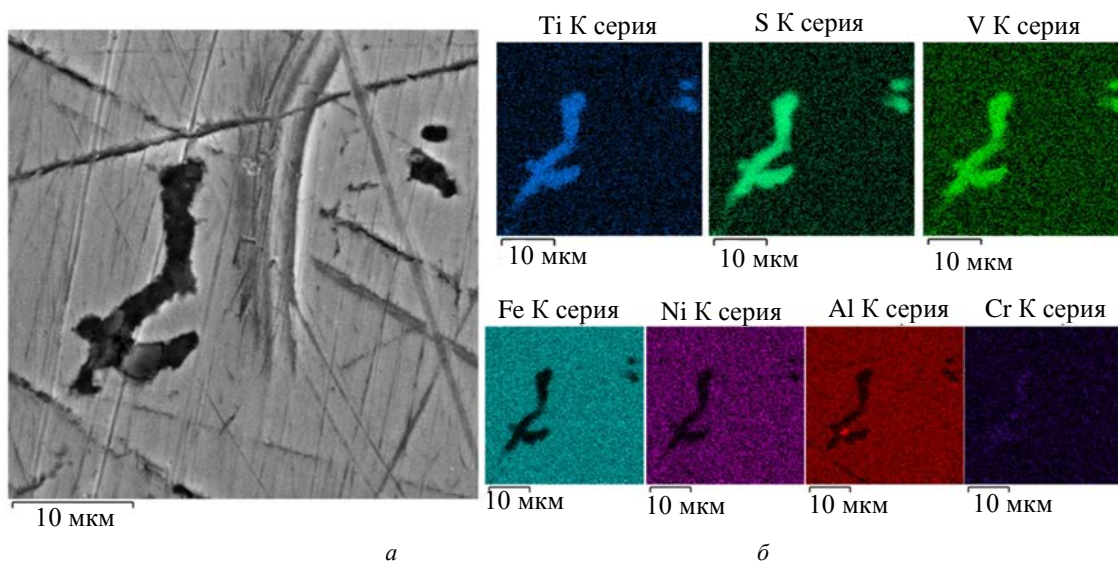


Рис. 5. Включение Ti и S: *a* – изображение включения на поверхности образца; *б* – карты элементного состава

Как было отмечено выше, сера является одним из вредных примесных элементов, содержание которого в жаропрочных никелевых сплавах систематически контролируется [10]. Она образует неметаллические включения в виде сульфидов MnS, FeS, CaS, Al₂S₃, CrS с компонентами сплавов. Эти включения являются концентраторами напряжений, инициирующими зарождение трещин, пузырьков и раковин при изготовлении и эксплуатации деталей и ухудшающими механические свойства сплавов: длительную прочность, пластичность и выносливость [11, 12].

В процессе исследования топографии поверхности также были обнаружены следующие дефекты: сколы на краях крепежных отверстий (рис. 6, *a*, *б*), расслоения материала (рис. 6, *в*, *г*), царапины на внутреннем ободе ротора (рис. 6, *д*, *е*), полости в материале (рис. 6, *ж*, *з*).

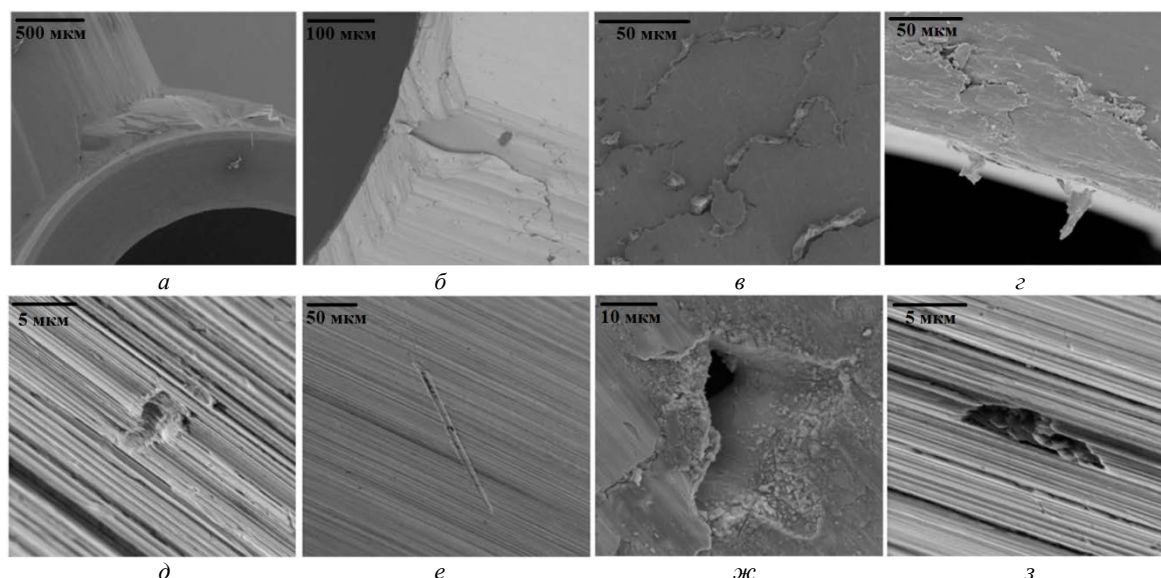


Рис. 6. Типичные дефекты на поверхности роторов: а, б – сколы на краях крепежных отверстий; в, г – расслоения материала; д, е – царапины; ж, з – полости в материале

Наличие большого количества включений и вышеописанных дефектов может повлечь за собой проблемы при эксплуатации. Эксплуатация ДПГ сопровождается тепловыми ударами до 60 °С при каждом запуске, ускорениями до 4000 g, вибрациями от работающего гиросмотора. В этих условиях развитие существующих дефектов на поверхности ротора и разрушение сульфидных включений неизбежно, что может привести к изменению положения центра масс гиросмотора и загрязнению зазоров газодинамической опоры, а значит – потере точности прибора и заклиниванию гиросмотора.

Закключение

В результате проведенных исследований разработана методика входного контроля роторов двухступенных поплавковых гироскопов, выполненных из сплава АЛНИ Ю10Н15. Предложенная методика включает три основных этапа: определение соответствия состава сплава техническим требованиям, оценка гомогенности сплава на основе однофакторного дисперсионного анализа и изучение топографии поверхности роторов.

На первом этапе исследований в химическом составе сплава АЛНИ Ю10Н15 детектировано наличие примесных элементов фтора и кобальта, которых согласно техническим требованиям быть не должно.

На втором этапе исследований анализ показал, что только у двух роторов из семи распределение основных элементов в сплаве носит гомогенный характер.

На третьем этапе выявлена существенная разница топологий поверхности роторов, изготовленных по единой технологии. Кроме того, были детектированы нежелательные примесные включения серы, потенциально являющиеся концентраторами напряжений, инициирующими зарождение трещин, пузырьков и раковин при эксплуатации деталей.

Все выявленные отклонения могут служить причинами отказа роторов двухступенных поплавковых гироскопов. В этой связи в процедуру контроля изготовления штатных роторов на основе разработанной методики введен дополнительный этап – рентгеноспектральный анализ.

Перспективы дальнейших работ связаны с исследованием влияния химического состава сплава роторов двухступенных поплавковых гироскопов на их магнитные характеристики [13].

Литература

1. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1. С. 3–16.
2. Da Roz A.L., Ferreira M., de Lima Leite F., Oliveira O.N., Jr. Nanocharacterization Techniques. William Andrew, 2017. 222 p.
3. Бивейнис А.И., Былинкин М.Н., Дубинин А.В., Смолян К.В., Матвеев В.А. Экспериментальное исследование малогабаритных газодинамических опор при наличии посторонних частиц на рабочих поверхностях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 6. С. 91–102.

References

1. Peshekhonov V.G. Gyroscopic systems: current status and prospects. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 111–118. doi: 10.1134/S2075108711030096
2. Da Roz A.L., Ferreira M., de Lima Leite F., Oliveira O.N., Jr. *Nanocharacterization Techniques*. William Andrew, 2017, 222 p.
3. Biveynis A.I., Bylinkin M.N., Dubinin A.V., Smolyan K.V., Matveev V.A. Experimental study of compact gas-dynamic bearings in the presence of foreign particles on the working surfaces. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2015, no. 6, pp. 91–102.

4. Kulkarni R., Murty B.S., Srinvas V. Study of microstructure and magnetic properties of AlNiCo (CuFe) high entropy alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. V. 746. P. 194–199. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.02.275
5. Rehman S.U., Ahmad Z., Haq A.U., Akhtar S. Effects of Zr alloying on the microstructure and magnetic properties of Alnico permanent magnets // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 442. P. 136–140. doi: 10.1016/j.jmmm.2017.06.114
6. Energy Dispersive Spectroscopy [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://nano.oxinst.com/products/eds> (дата обращения: 10.01.2019).
7. Рязанцев В.Д. Большая политехническая энциклопедия. М.: Мир и образование, 2011. 704 с.
8. Ross S.M. *Introductory Statistics*. Academic Press, 2017. 828 p.
9. Grech V. *WASP (Write a Scientific Paper) using Excel 9: Analysis of variance Early*. Human Development, 2018.
10. Yun W.D., Seo S.M., Jeong H.W., Yoo Y.S. The cyclic oxidation behaviour of Ni-based superalloy GTD-111 with sulphur impurities at 1100°C // *Corrosion Science*. 2015. V. 90. P. 392–401. doi: 10.1016/j.corsci.2014.10.030
11. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнлегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи (часть 1) // *Электротехнология*. 2014. № 3. С. 18–23.
12. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнлегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи (часть 2) // *Электротехнология*. 2014. № 5. С. 26–30.
13. Zhang C., Li Y., Han X.H., Du S.L., Sun J., Zhang Y. Structure and magnetic properties of Alnico ribbons // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018. V. 451. P. 200–207. (in Russian)
4. Kulkarni R., Murty B.S., Srinvas V. Study of microstructure and magnetic properties of AlNiCo (CuFe) high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 746, pp. 194–199. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.02.275
5. Rehman S.U., Ahmad Z., Haq A.U., Akhtar S. Effects of Zr alloying on the microstructure and magnetic properties of Alnico permanent magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol. 442, pp. 136–140. doi: 10.1016/j.jmmm.2017.06.114
6. Energy Dispersive Spectroscopy. 2019. Available at: <https://nano.oxinst.com/products/eds> (accessed: 10.01.2019).
7. Ryazantsev V.D. *Big Polytechnic Encyclopedia*. Moscow, Mir i Obrazovanie Publ., 2011, 704 p. (in Russian)
8. Ross S.M. *Introductory Statistics*. Academic Press, 2017, 828 p.
9. Grech V. *WASP (Write a Scientific Paper) using Excel 9: Analysis of variance Early*. Human Development, 2018.
10. Yun W.D., Seo S.M., Jeong H.W., Yoo Y.S. The cyclic oxidation behaviour of Ni-based superalloy GTD-111 with sulphur impurities at 1100°C. *Corrosion Science*, 2015, vol. 90, pp. 392–401. doi: 10.1016/j.corsci.2014.10.030
11. Sidorov V.V., Min P.G. Refining a complex nickel alloy to remove a sulfur impurity during vacuum induction melting: part I. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2014, no. 12, pp. 982–986.
12. Sidorov V.V., Min P.G. Refining a complex nickel alloy to remove a sulfur impurity during vacuum induction melting: part II. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2014, no. 12, pp. 987–991.
13. Zhang C., Li Y., Han X.H., Du S.L., Sun J., Zhang Y. Structure and magnetic properties of Alnico ribbons. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 451, pp. 200–207.

Авторы

Старцева Арина Валерьевна – инженер-технолог, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, Scopus ID: 54581562300, ORCID ID: 0000-0002-4509-2434, sav2405@gmail.com

Шарыгин Борис Леонидович – кандидат технических наук, главный конструктор, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-3658-4899, sharygin_bl@elprib.ru

Литуненко Елизавета Геннадьевна – инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-5280-0593, Lisa.litunenko@gmail.com

Authors

Arina V. Startseva – Processing engineer, Concern CSRI Electropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, Scopus ID: 54581562300, ORCID ID: 0000-0002-4509-2434, sav2405@gmail.com

Boris L. Sharygin – PhD, Design manager, Concern CSRI Electropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-3658-4899, sharygin_bl@elprib.ru

Elizaveta G. Litunenka – engineer, Concern CSRI Electropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-5280-0593, Lisa.litunenka@gmail.com