

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ТУРБУЛЕНТНОЙ ОЧИСТКИ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ В АВИАЦИОННОМ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Пейчев¹ Г.И., Колесник¹ П.А., Мурашкин¹ Е.И., Стельмах² А.У.,
Житницкий² А.Л., Кушев² А.В., Шимчук³ С.П.

¹ГП “ИВЧЕНКО-ПРОГРЕСС”

²Национальный авиационный университет

³Луцкий национальный технический университет

Показано, что наиболее эффективным способом очистки трущихся поверхностей подшипников качения является комбинированное бесконтактное импульсное электромагнитное и турбулентное воздействие на поверхности и микрочастицы ферромагнитной и другой природ. Физика процесса такой очистки заключается в подавлении коэрцитивных сил взаимодействия поверхностей тел различной массы путем изменения их магнитного состояния соответствующей частотой.

Ключевые слова. Шарикоподшипники, способы очистки, магнитная доменная структура, магнитная сила, импульсное электромагнитное и турбулентное воздействие

Постановка проблемы. Отличительной особенностью авиационных шарикоподшипников является то, что они в десятки и сотни раз дороже аналогичных с одинаковыми типоразмерами подшипников массового производства, используемых для широкого потребления в общем машиностроении, а также высокий (в десятки раз) больший ресурс по сравнению с межремонтным ресурсом газотурбинных двигателей (ГТД) и его агрегатов [1 – 3]. Поэтому полная замена шарикоподшипников при его ремонте в ходе эксплуатации – одна из весьма существенных статей расходов, которую несут ремонтные предприятия и, в конечном счете, авиакомпания-перевозчики. Убытки от неоправданно частой и преждевременной замены авиационных шарикоподшипников в ходе плановых ремонтов узлов и агрегатов ГТД оцениваются от 10 до 25% стоимости капитального ремонта. Поэтому разработка новых высокоэффективных методов реновации неразборных шарикоподшипников актуальная задача, решение которой позволит существенно уменьшить эксплуатационные расходы на ремонт авиационной техники.

Анализ последних исследований и публикаций. Шарикоподшипники сами по себе являются высокоточными и сложными изделиями, обладающими рядом конкурентных преимуществ по сравнению, например, с подшипниками скольжения. Ко всем подшипникам качения быстроходных изделий предъявляются известные высокие требования: способность выдерживать большие нагрузки, минимум потерь мощности, минимальный износ, избежание чрезмерных вибраций и другие. Авиационные же подшипники опор роторов ГТД и других агрегатов должны еще и надежно работать в широком интервале температур (от запуска при отрицательной температуре до режимной работы узла), воспринимать многократные перегрузки и перекосы колец во время маневрирования летательного аппарата [4, 5].

В производстве и в техобслуживании трибосистемы качения подвергаются очистке. Известны различные методы и технологий удаления загрязнений. С учетом конструктивных и технологических различий, а также особенностей эксплуатации подшипников, наибольшее распространение получили ультразвуковые методы их очистки. При этом для разрыхления и ослабления связей загрязнений с подложкой, и последующего их удаления используют преимущественно гидродинамическое воздействие. Как показали результаты исследований [4, 5], даже такой относительно эффективный метод, как ультразвуковой, не всегда обеспечивает требуемый уровень чистоты рабочих поверхностей неразборных подшипников качения.

Используемые в ГТД роликовые подшипники преимущественно разборные, поэтому каждая их деталь (ролики, кольца, сепаратор) достаточно легко поддаются очистке механическими, гидравлическими и ультразвуковыми методами. Неразборные же шарикоподшипники очистить от поверхностных загрязнений весьма проблематично, так как множество поверхностей трения (шарики, контактирующие с поверхностями окон сепараторов и дорожками колец качения, сами беговые дорожки) недоступны, скрыты от воздействия на них однонаправленных ультразвуковых полей или поля скоростей моющей среды при гидромеханическом воздействии.

Одним из наиболее удачных показателей качества шарикоподшипников является общий уровень вибраций (ОУВ) при прочих равных условиях осевого нагружения и частоты вращения. В ряде специальных изделий в качестве опор роторов используются приборные подшипники, к которым предъявляются высокие требования по величине ОУВ. Несмотря на все усилия ряда серийных заводов по повышению точности изготовления деталей, их ультразвуковой мойки на каждом этапе изготовления, включая этап окончательной сборки, подавляющее большинство (80%) таких шарикоподшипников имели повышенные значения ОУВ, относительно нормы 62 дБ. Высокий процент отбраковки таких спецподшипников predetermined поиск причин повышенного ОУВ со стороны отечественных ГПЗ, а потребители таких подшипников вынуждены были производить их закупку за рубежом в Японии и Германии. Проблему повышенной вибрации не только приборных, а и авиационных шарикоподшипников пытались решить несколько научных лабораторий и институтов, в том числе и лаборатория «Нанотехнологий» НАУ.

Тщательные исследования показали, что причиной высоких значений общего уровня вибраций шарикоподшипников является наличие на рабочих поверхностях тел и дорожек качения, а также сепаратора значительного количества микро-, субмикро- и наночастиц ферромагнитной природы. Анализ показал, что их присутствие на поверхностях шарикоподшипников, которые в настоящее время поставляются в герметичных упаковках – результат естественного оседания высокодисперсных ферромагнитных частиц, которыми перенасыщена производственная атмосфера подшипниковых предприятий-изготовителей. К сожалению, в ряде отечественных ГПЗ и ГПЗ стран СНГ вся промышленная зона пронизана высокодисперсными частичками, возникающими в ходе технологических операций точения, шлифования, полирования ферромагнитных подшипниковых сталей. Ведущие компании мира достигли существенно более высоких показателей не только по качеству изготовления и культуры производства, но и чистоты воздуха в промышленных зонах изготовления деталей и сборки шарикоподшипников различного назначения. Однако проблема загрязнений трактов качения неразборных подшипников по-прежнему остается актуальной и для мировых брендов подшипниковой индустрии.

Как известно шарикоподшипниковые стали типа ШХ15 являются типичным ферромагнетиками. Этот класс конструкционных сталей, согласно современной теории микромагнетизма, характеризуется свойствами спонтанной (самопроизвольной) намагниченности, которая описывается классическим векторным полем: $J(r) = J_s \cdot \alpha(r)$, где α – единичный вектор, а J_s – намагниченность насыщения. Равновесное распределение $\alpha(r)$ определяется из теории микромагнетизма при помощи вариационного принципа, который постулируется следующим образом: при действительном распределении намагниченности полная свободная энергия, состоящая из различных вкладов, должна быть минимальной. Все ферромагнетики имеют доменную структуру, которая отражает магнитные свойства как частиц от нано- и микро- до макромасштабов. То есть доменную структуру имеют как детали шарикоподшипников, так и микрочастицы возникшие в ходе подшипникового производства. Механизм формирования доменных структур в подшипниковых деталях обусловлен совместным действием эффективных полей [6 – 8] обмена, анизотропии, Зеемана (внешнее магнитное поле), магнитостатического и упругих напряжений.

Процессы намагничивания и перемагничивания определяются свойствами доменной структуры (ДС). Магнитная доменная структура – совокупность областей в магнитной подсистеме ферромагнитных материалов, которые связывают микроскопические магнитные характеристики с их макроскопическими свойствами.

Метод порошковых фигур Акулова– Битера (магнитной суспензии) был применен при первых наблюдениях ДС [7], которые подтвердили её существование и состоит в нанесении на хорошо полированную поверхность магнитного материала магнитной суспензии (взвешенные в жидкости однодоменные частицы магнетита Fe_3O_4) массой m . На частицы действует сила

$$F \sim m(dH/dx) \quad (1)$$

Эти частицы притягиваются в область доменных границ, поскольку наибольший градиент поля вблизи края доменов. При этом, как правило, прорисовываются доменные границы.

Для компенсации силы F необходимо приложить внешнее магнитное поле, при котором намагниченность в материале, предварительно намагниченном до насыщения, становится равной нулю (коэрцитивная сила). Она определяется средней величиной сил, задерживающих необратимое смещение границ между доменами при перемагничивании. Задерживать смещение границ между доменами могут неферромагнитные включения разной формы и дисперсности, напряжения, обусловленные дислокациями и другими причинами, и градиенты напряжений,

границы фаз, зерен и субзерен, а также прочие неоднородности и дефекты кристаллического строения. Это обуславливает тот факт, что коэрцитивная сила является одной из наиболее структурно чувствительных характеристик ферромагнитных материалов.

Обширные совместные исследования НИЛ НАУ и ГП «Ивченко-прогресс» авиационных шарикоподшипников различных компаний-производителей позволили констатировать, что как новые, так и шарикоподшипники после длительной эксплуатации, на своих поверхностях удерживают значительное количество металлических ферромагнитных и других загрязнений, которые не удаляются ультразвуковым методом.

Цель исследования. На основании использования бесконтактной магнитно-турбулентной очистки шарикоподшипников определить эффективность этого способа.

Основные результаты исследования. Разработанный в научно-исследовательской лаборатории «Нанотриботехнологий» НАУ стенд очистки подшипников качения ОПШ-01М [9 – 11], установленный в отделе главного металлурга ГП «Ивченко-прогресс», позволяет эффективно удалять со всех поверхностей тракта качения микро- и наночастицы ферромагнитной и другой природы путем комбинированного воздействия импульсными магнитными полями и турбулентными течениями жидкости (рис. 1).

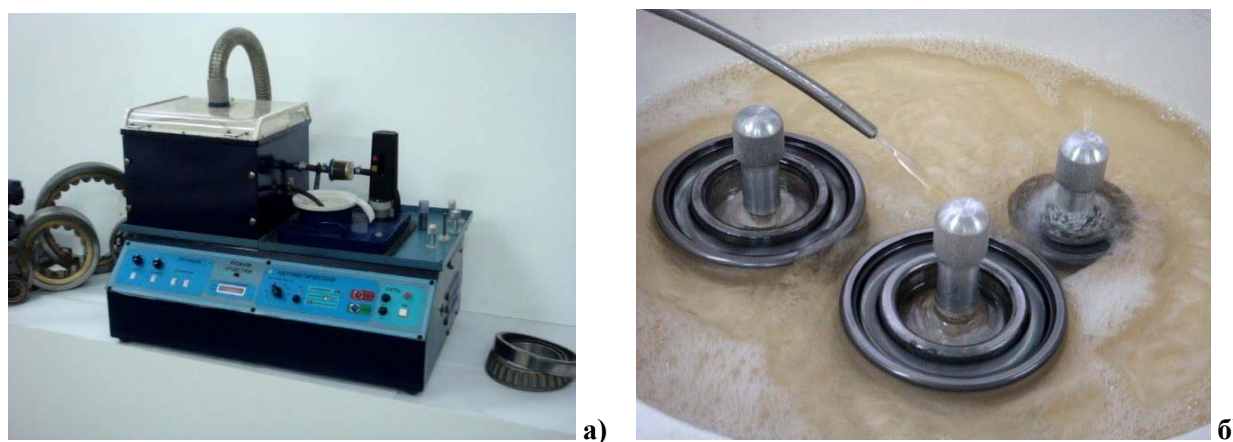
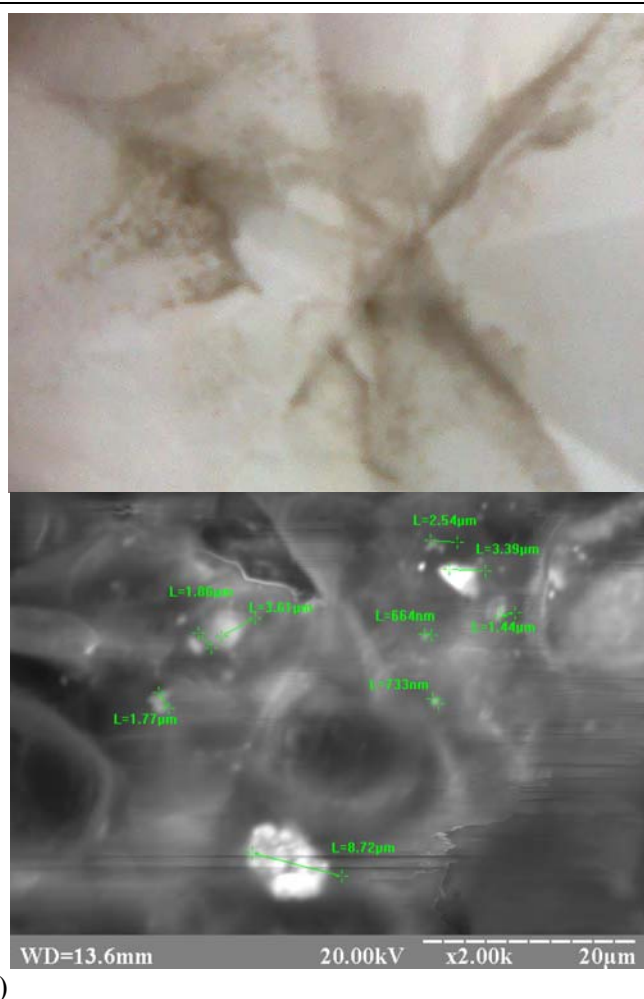


Рис. 1. Внешний вид стенда очистки шарикоподшипников ОПШ-01 (а) и камера очистки трех подшипников с разными типоразмерами (б)

Стенд ОПШ-01М, модернизированный новой программой управления (частота импульсно-магнитного поля, длительность однонаправленных циклов очистки, реверсивность, ускорение), позволяет усовершенствовать предложенные и разрабатывать новые методики очистки шарикоподшипников в сборе. Рекомендуется стенд внедрять не только на этапе реновации подшипников в ходе ремонта ГТД, но и в качестве предэксплуатационной очистки новых подшипников.

ГП «Ивченко-Прогресс» планируется совместно с лабораторией «Нанотриботехнологий» НИЧ НАУ разработать новую систему очистки, дополненную ультразвуковым методом, что позволит существенно улучшить качество удаления как твердых частиц, так и углеводородных отложений и структурообразований на поверхностях качения. Это особенно важно для подшипников после длительной эксплуатации в условиях высоких температур.

Обеспечение высокой чистоты всех поверхностей деталей ГТД и особенно шарикоподшипниковых при сборке новых ГТД является актуальной проблемой в серийном производстве. Эта проблема решается следующим образом. Новые заводские шарикоподшипники с консервационным маслом или смазкой, в герметичной упаковке, расконсервируются, промываются и подвергаются ультразвуковой промывке. После этого эти подшипники устанавливаются в камеру очистки стенда ОПШ-01 и подвергаются воздействию на их поверхности комбинированными импульсными магнитно-турбулентными полями в среде авиационного керосина ТС-1. Через несколько минут такой процедуры на дне камеры визуально наблюдается скопление микроскопических металлических частиц, которые легко удаляются с помощью постоянного магнита (рис. 2).



а)

б)

Рис. 2. Внешний вид фильтра с ферромагнитными частицами, удаленными из новых шарикоподшипников после очистки на ОПШ-01 в течении 4 минут каждый (а) и результаты измерений размеров частиц на электронном микроскопе РЭМ-106И (б)

Такие же исследования проводились на подшипниках как отечественного, так и зарубежного производства. Всегда наблюдалось удаление из тракта качения подшипников достаточно большое количество ферромагнитных загрязнений. Ясно, что эти частицы при эксплуатации ГТД с первых секунд начнут играть свою неблагоприятную роль. Поэтому предэксплуатационную очистку шарикоподшипников следует проводить на серийных заводах изготовителях ГТД, что существенно, по мнению авторов повлияет на функциональные качества ГТД и внесет свой положительный эффект в безопасность полетов.

С целью повышения эффективности существующих и разработки новых методов и технологий очистки узлов машин и механизмов авторами был проведен ряд исследований, направленных на создание физико-математической модели поведения частиц загрязнений и изучения влияния сил, воздействующих в процессе очистки на компоненты загрязнений рабочих поверхностей подшипника. На рис 2. представлены фотографии внешнего вида фильтра с ферромагнитными частицами, удаленными из новых шарикоподшипников (предварительно распакованных из гермоупаковки и расконсервированных ультразвуковым методом) после очистки на ОПШ-01 в течении 4 минут каждый (а) и результаты измерений размеров частиц на электронном микроскопе РЭМ-106И (б). Распределение количества частиц размерами от 1 мкм до 720 мкм по фракционному составу описывается экспоненциальной функцией: с уменьшением размера количество частиц экспоненциально возрастает.

В качестве объекта исследования был выбран шарикоподшипник серии 203. Режим потока моющей жидкости, проходящей через подшипник, поддерживался турбулентным, как наиболее распространенный в известных методах и способах, что позволяет эффективно реструктурировать загрязнения и удерживать их в потоке моющей среды. С учетом этих условий, следует обратить внимание на то, что при очистке известными методами на частицу, находящуюся на поверхности тракта качения подшипника, действуют следующие силы (рис. 3): гравитационная составляющая

F_g , кулоновские силы FG сила Архимеда F_{arb} , сила гидродинамического сопротивления F_{gidro} , сила адгезии F_{adg} , магнитная составляющая доменов F_m [12].

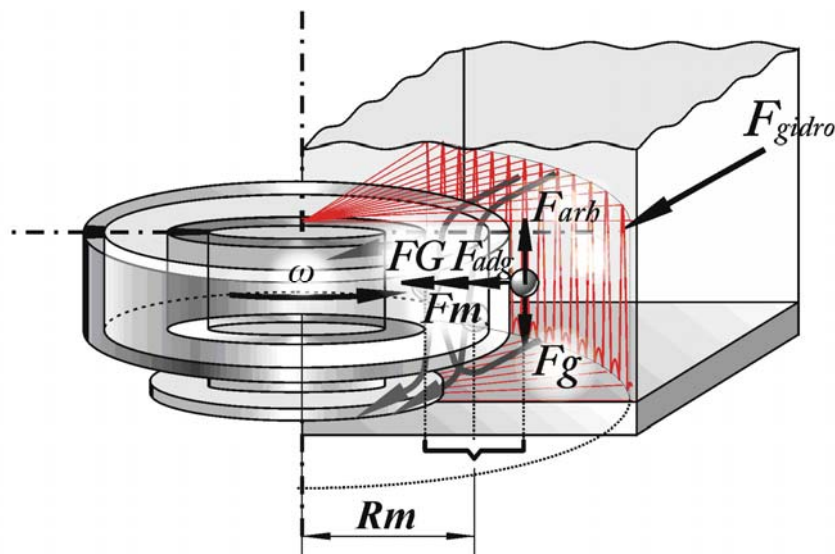


Рис. 3. Силы, действующие на частицу при очистке подшипника

В качестве моющей среды преимущественно используются углеводородные жидкости и поверхностно активные вещества. Керосины относят к низкомолекулярным углеводородным соединениям. Молекулы керосина в среднем содержат 8 метиленовых групп (рис. 4), [10].

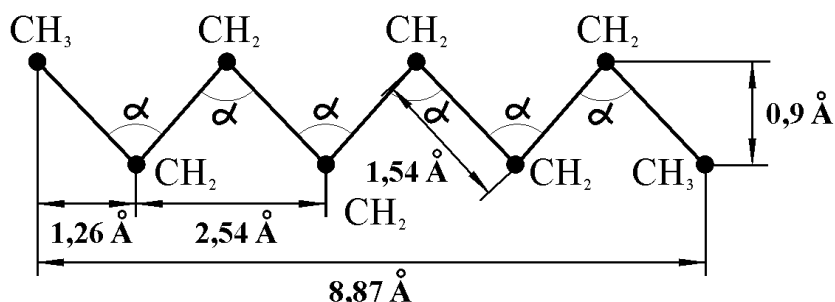


Рис. 4. Структура молекулы керосина

Количественная оценка этих сил при среднем значении параметров частиц и внешних воздействий позволяет выделить две значимые силы: сила гидродинамического сопротивления и сила магнитного взаимодействия.

Исходя из вышеизложенного, наибольшей силой, действующей на загрязнения, в процессе очистки поверхности, является гидродинамическая сила. Согласно формуле Н.Е. Жуковского [12] сила лобового сопротивления частицы сферической формы в потоке моющей среды составляет

$$F_x = 0,2 \cdot \pi \cdot d_q^2 \cdot \rho \cdot \Delta u^2 \quad (2),$$

где d_q – диаметр частицы, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; Δu – скорость потока жидкости относительно частицы, м/с.

В случае использования в качестве моющей среды керосина при скорости потока $\Delta u = 1,2$ м/с, достаточной для образования турбулентного характера течения в каналах подшипника качения, сила лобового сопротивления рассматриваемой частицы составит от $7,24 \cdot 10^{-12}$ до $7,24 \cdot 10^{-8}$ Н.

Необходимо также учитывать, что с уменьшением размера фракций загрязнения требуется увеличение минимально достаточной для отрыва средней скорости потока. Экспериментальное и теоретическое исследования подтверждают уменьшение скорости движения моющей жидкости в приграничных слоях, а также то, что значительное количество особо мелких частиц затенено неровностями поверхности. Существенно, что шероховатость может служить и турбулизатором потока. Наличие в таком течении поперечных пульсаций скоростей жидкости (в поперечном сечении) способствует переносу твердых частиц в массу моющей среды и поддержанию их во взвешенном состоянии [11].

Анализ литературных источников, а также результаты проведенных авторами экспериментов показали, что на границах доменов конструкционных материалов имеют место достаточно сильные магнитные поля, что вместе с остаточной намагниченностью деталей в значительной степени препятствует [9] отрыву и удалению с из рабочих поверхностей частиц загрязнений ферромагнитной природы.

С учетом этого рассматриваемую систему (рис. 5) можно представить совокупностью пар диполей.

Для частицы m_1 загрязнения, на поверхности которого магнитная индукция B составляет 10 мТл (при допущении идентичности материала загрязнения и деталей подшипника), напряженность магнитного поля примет вид:

$$H = \frac{B}{(\mu_0 \mu_m)} = 1,45(A/m) \quad (3),$$

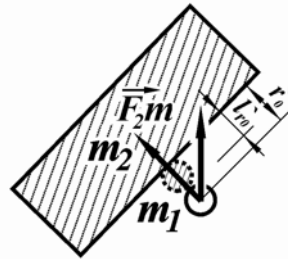


Рис. 5. Магнитное взаимодействие частицы загрязнения ферромагнитной природы с обоймой подшипника

Тогда намагниченность будет соответствовать:

$$M_m = \frac{B}{\mu_0} - H = 7956,3(A/m) \quad (4)$$

Для рассматриваемой частицы с объемом V_{m1} в диапазоне от $5,24 \cdot 10^{-22}$ до $5,24 \cdot 10^{-16}$ м³ и объема обоймы подшипника $V_{m2} = 4,9 \cdot 10^{-6}$ м³ момент диполя равен:

$$P = M_m \cdot V = ql \quad (5)$$

Магнитная сила взаимодействия частицы в поле внутреннего кольца подшипника составит:

$$F_m = \frac{\mu_0 q_1 H}{4\pi} \quad (6)$$

и для рассматриваемого случая будет принимать значения от $2,9 \cdot 10^{-14}$ до $2,9 \cdot 10^{-7} H$.

Выводы

1. Традиционными гидравлическими и ультразвуковым методами реализовать отрыв частиц загрязнений с деталей неразборных шарикоподшипников, а также вынос их и удержание во взвеси моющего раствора крайне затруднено. Это объясняется наличием узких зазоров между трущимися

поверхностями тел качения с сепаратором и беговыми дорожками, затененных от прямого внешнего воздействия на них ультразвуковым или гидравлическим полем.

2. Причиной снижения эффективности очистки известными методами есть сложный профиль полостей трибосистем качения, затрудняющий удаление частиц микро-, субмикро- и наноуровня, а также недостаточная изученность электромагнитного их взаимодействия с ферромагнитными деталями подшипников на границах высокоградиентных магнитных доменных структур тел качения, сепараторов и колец.

3. Численное оценочное сопоставление сил удержания частиц загрязнений на поверхностях трибосистем качения подтвердило необходимость особого рассмотрения магнитного взаимодействия исследуемых ферромагнитных объектов на доменном уровне.

4. Применение стенда очистки шарикоподшипников ОПШ-01М на ГП «Ивченко-прогресс» показала высокую эффективность методик и стенда как на стадии предэксплуатационной очистки новых подшипников качения, так и на этапе их межремонтной дефектации.

1 С.В. Вонсовский. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро-, и ферримагнетиков.//Москва, "Наука" 1971, 805 с.

2. Кандаурова Г.С., Оноприенко Л.Г. Основные вопросы теории магнитной доменной структуры. Св-к, 1977

3. С. Тикадзуми. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и их применения.//Москва, "МИР", 1987, 420 с.

4. Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель Л.Я. Подшипники качения. Справочник. М.: Машиностроение, 1975. - 575с.

5. Белоусов А.И., Балякин В.Б., Новиков Д.К. Теория и проектирование гидродинамических демпферов опор роторов/ Под ред. А.И. Белоусова. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2002. — 335 с.

6. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. М.: Машиностроение, 1979. — 702 с.

7. Оптимизация профилей рабочих поверхностей цилиндрических роликоподшипников при перекосах колец: Отчет по НИР/ Завод авиационных подшипников. Руководитель темы Жильников Е.П. - Самара, 2008. - 32 с., ил.

8. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: Справочник каталог. - М.: Машиностроение, 2003. — 576с.; ил.

9. Аксьонов О. Ф., Стельмах О.У., Костюник Р. С., Кушев О. В. Електромагнітна складова утворення феромагнітних забруднень.// Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ 2006. – Вип.46. – С. 91 – 102.

10. Аксьонов О. Ф., Костюник Р. С., Кушев О. В. Підвищення функціональної якості підшипників кочення шляхом електромагнітного очищення.//Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ 2008. – Вип.49. – Т. 1. С.9 – 13.

11. Аксенов А.Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости.– М.: Транспорт., 1965. – 171 с.

12. Беянин П.Н., Данилов В.М. Промышленная чистота машин. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.

Пейчев Г.И., Колесник П.О., Мурашкин Е.И. та ін. Використання безконтактної магнітно-турбулентної очистки шарикопідшипників в авіаційному двигунобудуванні. Показано, що найбільш ефективним способом очищення трибоповерхонь підшипників кочення є комбінований безконтактний імпульсний електромагнітний і турбулентний вплив на поверхні і мікрочастинки феромагнітної та іншої природ. Фізика процесу такого очищення полягає в придушенні коерцитивних сил взаємодії поверхонь тіл різної маси шляхом зміни їх магнітного стану відповідною частотою.

Peychev G.I. Kolesnik P.A., Murashkin E.I. and others. The use of contactless magnetic turbulent cleaning ball in the aviation engine. One way to improve resource and operational characteristics of rolling bearings is the effective removal of dirt from working surfaces, which is particularly important for special and precision bearings are widely used in various industries, and helps prevent premature wear and reduce their maintenance costs and repairs.

This article has shown that the most effective way to clean trybopoverhon rolling bearing combinations contactless electromagnetic pulse and turbulent effect on the surface and ferromagnetic microparticles and other natures. Physics of the cleaning process is to suppress the coercive forces of interaction surfaces of bodies of different masses by changing their status magnet appropriate frequency.

The result is discussed in the article studies was defined parameters that ensure maximum efficiency mode, which enables its use in industry for the removal of contaminants varied nature with a wide range of sizes of bearings for minimum required time.

Стаття надійшла в редакцію 12.05.2014 р.