

УДК 62.229.315 (043.2)

Р.Е. КОСТЮНИК

Национальный авиационный университет

МЕТОД БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ТУРБУЛЕНТНОЙ ОЧИСТКИ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ

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: трущиеся поверхности, подшипник, магнитно-турбулентная очистка, микрочастицы.

R.E. KOSTYUNIK

National Aviation University

METHOD OF CONTACTLESS MAGNETIC-TURBULENT CLEANING OF BALL-BEARINGS

It is shown that the most effective expedient of clearing of rubbing surfaces of bearings is the combined noncontact pulsing electromagnetic and turbulent action on surfaces and microparticles of the ferromagnetic and other nature. The physics of process of such clearing consists in inhibition of coercive forces of interaction of surfaces of bodies of various mass by change of their magnetic state by corresponding frequency.

Keywords: rubbing surfaces, the bearing, magnetic-turbulent clearing, microparticles.

Введение

Отличительной особенностью авиационных шарикоподшипников является то, что они в десятки и сотни раз дороже аналогичных с одинаковыми типоразмерами подшипников массового производства и имеют значительно больший ресурс по сравнению с межремонтным ресурсом ГТД и его агрегатов [1, 2, 3]. Поэтому полная замена шарикоподшипников при его ремонте в ходе эксплуатации – одна из весьма существенных статей расходов, которую несут ремонтные предприятия и авиакомпании-перевозчики. Убытки 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.

Постановка задачи

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.

Одним из более важных показателей качества шарикоподшипников является общий уровень вибраций (ОВУ) при прочих равных условиях осевого нагружения и частоты вращения. 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. 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.

Согласно современной теории микромагнетизма шарикоподшипниковые стали типа ШХ-15 являются типичным ферромагнетиками. Все ферромагнетики имеют доменную структуру, отражающую магнитные свойства как частиц от нано- и микро- до метрового масштабов. Таким образом, доменную структуру имеют как детали шарикоподшипников, так и микрочастицы, образующиеся в ходе подшипникового производства. Механизм формирования доменных структур в подшипниковых деталях обусловлен совместным действием эффективных полей [6, 7, 8] обмена, анизотропии, Зеемана (внешнее магнитное поле), магнитостатического и упругих напряжений.

Результаты исследования

Обширные исследования 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.

Разработанный в научно-исследовательской лаборатории нанотриботехнологий Национального авиационного университета стенд очистки подшипников качения ОПШ-01М [9–11] 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).

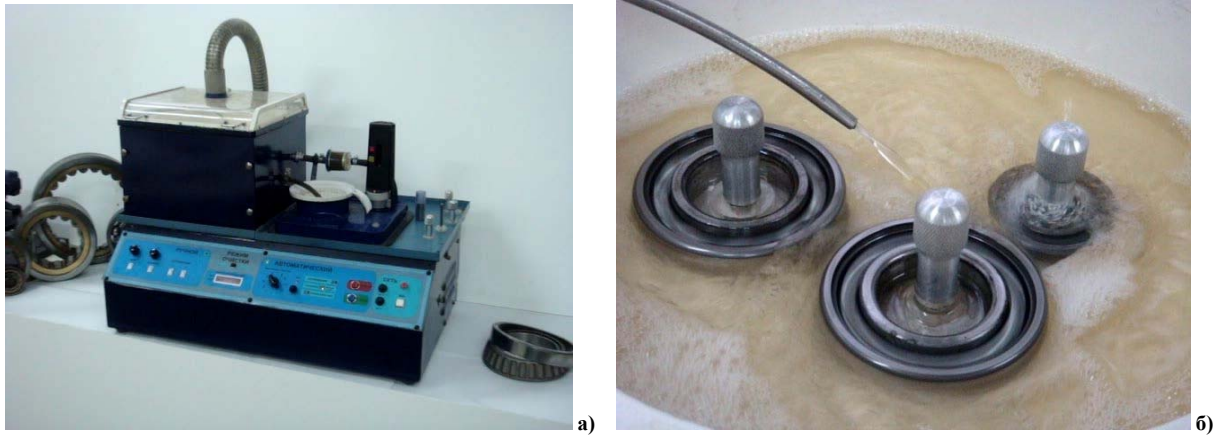


Рис. 1. Внешний вид стенда очистки шарикоподшипников ОПШ-01 (а) и камера очистки трех подшипников с разными типоразмерами (б)

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.

Обеспечение высокой чистоты всех поверхностей деталей ГТД, 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 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).

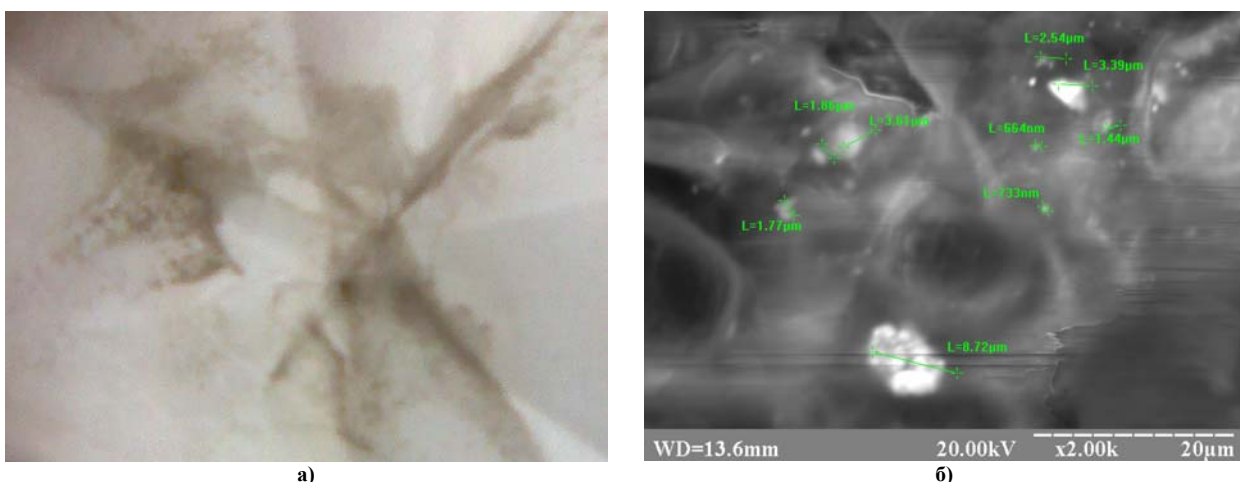


Рис. 2. Внешний вид фильтра с ферромагнитными частицами, удаленными из новых шарикоподшипников после очистки на ОПШ-01 в течении 4 минут каждый (а), и результаты измерений размеров частиц на электронном микроскопе РЭМ-106И (б)

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 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. В качестве моющей среды преимущественно используются углеводородные жидкости и поверхностно-активные вещества, например керосин, относящийся к низкомолекулярным углеводородным соединениям. 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].

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

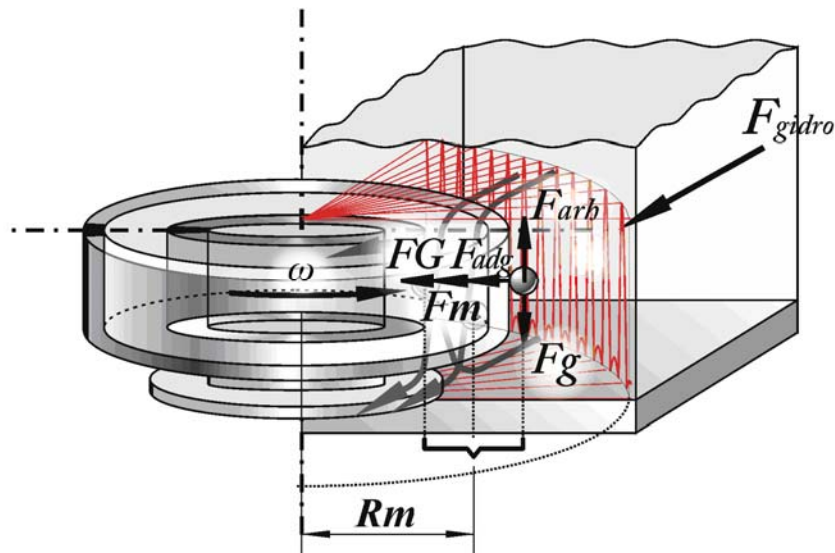


Рис. 3. Силы, действующие на частицу при очистке подшипника

Исходя из вышеизложенного, наибольшей силой, воздействующей 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

$$F_x = 0,2 \cdot \pi \cdot d_q^2 \cdot \rho \cdot \Delta u^2, \quad (1)$$

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 можно представить совокупностей пар диполей (рис. 4.).

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:

$$H = \frac{B}{(\mu_0 \mu_m)} = 1,45(A/m) \tag{2}$$

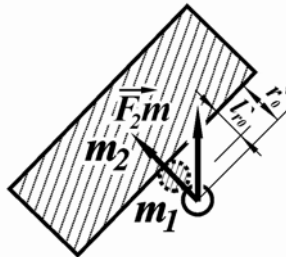


Рис. 4. Магнитное взаимодействие частицы загрязнения ферромагнитной природы с обоймой подшипника

Тогда намагниченность будет соответствовать

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

Для рассматриваемой частицы с объемом V_{m1} в диапазоне от $5,24 \cdot 10^{-22}$ до $5,24 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3$ и объема обоймы подшипника $V_{m2} - 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ момент диполя равен

$$P = M_m \cdot V = ql \tag{4}$$

Магнитная сила взаимодействия частицы в поле внутреннего кольца подшипника составит

$$F_m = \frac{\mu_0 q_1 H}{4\pi} \tag{5}$$

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

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. Очистка шарикоподшипников на стенде ОПШ-01М показала высокую эффективность данного метода, как для новых подшипников качения, так и для бывших в эксплуатации.

Литература

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферромагнетиков / Вонсовский С.В. – М. : Наука, 1971. – 805 с.
2. Кандаурова Г.С. Основные вопросы теории магнитной доменной структуры / Кандаурова Г.С., Оноприенко Л.Г. – Свердловск, 1977.
3. Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и их применения / Тикадзуми С. – М. : Мир, 1987. – 420 с.
4. Бейзельман Р.Д. Подшипники качения. Справочник / Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель Л.Я. – М. : Машиностроение, 1975. – 575 с.
5. Белоусов А.И. Теория и проектирование гидродинамических демпферов опор роторов / Белоусов А.И., Балякин В.Б., Новиков Д.К. – Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2002. – 335 с.

6. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. – М. : Машиностроение, 1979. – 702 с.
7. Оптимизация профилей рабочих поверхностей цилиндрических роликоподшипников при перекосах колец : Отчет по НИР / руководитель темы Жильников Е.П. / Завод авиационных подшипников. – Самара, 2008. – 32 с.
8. Черменский О.Н. Подшипники качения : справочник-каталог / О.Н. Черменский, Н.Н. Федотов. – М. : Машиностроение, 2003. — 576 с.
9. Аксьонов О. Ф. В. Електромагнітна складова утворення феромагнітних забруднень / О. Ф. Аксьонов, О.У. Стельмах, Р. Є. Костюнік, О. В. Кушев // Проблеми тертя та зношування. – К. : НАУ, 2006. – Вип.46. – С. 91 – 102.
10. Аксьонов О.Ф. Підвищення функціональної якості підшипників кочення шляхом електромагнітного очищення / О. Ф. Аксьонов, Р. Є. Костюнік, О. В. Кушев // Проблеми тертя та зношування. – К. : НАУ, 2008. – Вип.49. – Т. 1. – С. 9 – 13.
11. Аксенов А.Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости / Аксенов А.Ф. – М. : Транспорт., 1965. – 171 с.
12. Белянин П.Н. Промышленная чистота машин / Белянин П.Н., Данилов В.М. – М. : Машиностроение, 1982. – 224 с.

References

1. Magnetizm. Magnitnye svojstva dia-, para-, ferro-, antiferro-, i ferromagnetikov / Vonsovskij S.V. – Moskva: Nauka, 1971. - 805 s.
2. Kandaurova G.S. Osnovnye voprosy teorii magnitnoj domennoj struktury / Kandaurova G.S., Onoprienko L.G. - Sverdlovsk, 1977.
3. Tikadzumi S. Fizika ferromagnetizma. Magnitnye karakteristiki i ih primeneniya / Tikadzumi S. – Moskva: Mir, 1987. - 420 s.
4. Bejzel'man R.D. Podshipniki kachenija. Spravochnik / Bejzel'man R.D., Cypkin B.V., Pere'l L.Ja. - M.: Mashinostroenie, 1975. - 575s.
5. Belousov A.I. Teorija i proektirovanie gidrodinamicheskikh dempferov opor rotorov / Belousov A.I., Baljakin V.B., Novikov D.K. - Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2002. — 335 s.
6. Birger I.A. Raschet na prochnost' detalej mashin: Spravochnik / Birger I.A. , Shorr B.F., Iosilevich G.B. - M.: Mashinostroenie, 1979. — 702 s.
7. Optimizacija profilej rabochih poverhnostej cilindricheskikh rolikopodshipnikov pri perekosah kolec: Otchet po NIR / Zavod aviacionnyh podshipnikov. Rukovoditel' temy Zhil'nikov E.P. - Samara, 2008. - 32 s.
8. Chermenskij O.N., Fedotov N.N. Podshipniki kachenija: Spravochnik katalog / Chermenskij O.N., Fedotov N.N. - M.: Mashinostroenie, 2003. — 576 s.
9. Aks'onov O. F. V. Elektromagnitna skladova utvorennya feromagnitnih zabrudnen' / Aks'onov O. F., Stel'mah O.U., Kostjunik R. C., Kushhev O. V. // Problemi tertja ta znoshuvannja. – K.: NAU, 2006. – Vip.46. – С. 91 – 102.
10. Aks'onov O.F. Pidvishhennja funkcional'noi jakosti pidshipnikiv kochennja shljahom elektromagnitnogo ochishhennja / Aks'onov O. F., Kostjunik R. C., Kushhev O. V. //Problemi tertja ta znoshuvannja – K.: NAU, 2008. – Vip.49. – Т. 1. S.9 – 13.
11. Aksenov A.F. Aviacionnye topliva, smazochnye materialy i special'nye zhidkosti.– M.: Transport., 1965. – 171 s.
12. Beljanin P.N. Promyshlennaja chistota mashin / Beljanin P.N., Danilov V.M. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 224 s.

Рецензія/Peer review : 7.1.2015 р. Надрукована/Printed :25.1.2015 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Бойченко С.В.