

УДК 62.229.315 (043.2)

**А.В. Куцев**  
**МЕХАНИЗМ БЕСКОНТАКТНОЙ МАГНИТНО-ТУРБУЛЕНТНОЙ ОЧИСТКИ**  
**ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ**

*Показано, что наиболее эффективным способом очистки трущихся поверхностей подшипников качения является бесконтактное магнитно-турбулентное воздействие как на поверхности, так и на микрочастицы ферромагнитной и другой природы, а физика процесса такой очистки заключается в перемагничивании поверхностей тел различной массы с фиксированной частотой.*

*Ключевые слова: трущиеся поверхности, подшипник, магнитно-турбулентная очистка, микрочастицы*  
*Рис. 3. Форм. 9. Лит. 4.*

**О.В. Куцев**  
**МЕХАНІЗМ БЕЗКОНТАКТНОГО МАГНІТНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ОЧИЩЕННЯ**  
**ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ**

*Показано, що найбільш ефективним способом очищення поверхонь тертя підшипників кочення є безконтактний магнітно-турбулентний вплив як на поверхні, так і на мікрочастинки феромагнітної та іншої природи, а фізика процесу такого очищення полягає в перемагнічуванні поверхонь тіл різної маси з фіксованою частотою.*

*Ключові слова: тертьові поверхні, підшипник, магнітно-турбулентна очистка, мікрочастинки*

**О. Kuschew**  
**THE MECHANISM OF NON-CONTACT MAGNETIC TURBULENT CLEANING OF**  
**ROLLING BEARINGS**

*Shown that the most effective way to clean the friction surfaces of rolling bearings are contactless magnetic turbulent effects both on the surface and in the ferromagnetic microparticles and other nature and physics of this process is the reversal treatment of surfaces of bodies of different masses with a fixed frequency.*

*Keywords: friction surfaces, bearings, magnetic turbulent cleaning, microparticles.*

**Постановка проблемы.** 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 [1, 2], даже такие относительно эффективные методы не всегда обеспечивают требуемый уровень чистоты.

**Изложение основного материала статьи.** С целью повышения эффективности существующих и разработки новых методов и технологий очистки узлов машин и механизмов в лаборатории нанотриботехнологий НАУ был проведен ряд исследований, направленных на построение основы физико-математической модели поведения частиц загрязнений и изучения влияния сил, воздействующих в процессе очистки на компоненты загрязнений рабочих поверхностей подшипника. В качестве объекта исследования был выбран шарикоподшипник серии 203. Характер потока моющей жидкости, проходящей через подшипник, поддерживался турбулентным, как наиболее распространенный в известных методах и способах. Реализуется его способность 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.1): гравитационная составляющая  $F_g$ , сила Архимеда  $F_{arb}$ , сила гидродинамического сопротивления  $F_{gidro}$ , сила адгезии  $F_{adg}$ , магнитная составляющая доменов  $F_m$  [1].

Гравитационные силы отражают взаимодействие двух тел с массами  $m_1$  и  $m_2$

$$F_g = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (\text{Н}), \quad (1)$$

где:  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \left( \frac{\text{М}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2} \right)$ ,  $r$ - расстояние между телами.

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. 2), [3].

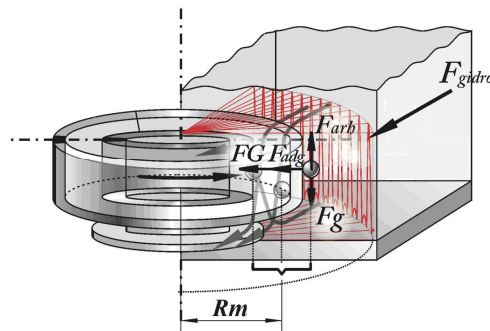


Рис. 1. Силы, действующие на частицу при очистке подшипника

Таким образом, расстояние между поверхностями, смоченными мономолекулярным слоем керосина составит 1,774 нм. Масса частицы диаметром 0,1...10 мкм находится в диапазоне  $0,4 \cdot 10^{-21} \dots 0,4 \cdot 10^{-14}$  кг. С учетом этих значений из формулы (1) следует, что для частицы загрязнения размером 0,1...10 мкм гравитационная составляющая в среде керосина для случая с подшипником серии 208 (масса внутреннего кольца – 0,038 кг) будет находиться в диапазоне от  $3,23 \cdot 10^{-16}$  до  $3,23 \cdot 10^{-9}$  Н и зависит от размера частицы.

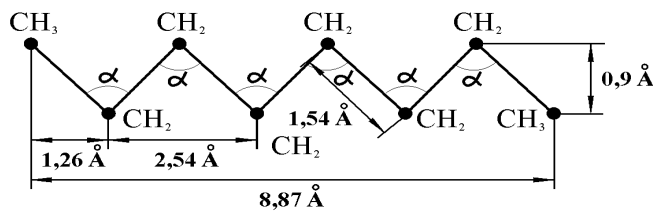


Рис. 2. Структура молекулы керосина

Силу Архимеда  $F_{arh}$ , действующую на частицу в промывающем растворе, описывает выражение:

$$F_{arh} = \rho q V \quad (2)$$

Сила гравитационного притяжения Земли действующие на частицы загрязнения определяются их размерами  $F = mg_0$ , и составляют в для указанных выше условий  $0,39 \cdot 10^{-20} \dots 0,39 \cdot 10^{-13}$  Н. С учетом разделения частиц загрязнений мономолекулярным слоем керосина, адгезионной составляющей силы можно пренебречь.

Силы Ван-дер-Ваальса проявляются на расстоянии диаметров атомов. Так как расстояние между поверхностями частицы и обоймы не менее 2-х длин молекул керосина, то силами межатомного притяжения также можно пренебречь.

Согласно формуле Н.Е. Жуковского [4] сила лобового сопротивления частицы сферической формы в потоке моющей среды определяется формулой:

$$F_x = 0,2 \cdot \pi \cdot d_c^2 \cdot \rho \cdot \Delta u^2 \quad (3)$$

где:  $d_c$  – диаметр частицы, м;  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\Delta u$  – скорость потока жидкости относительно частицы, м/с.

В случае использовании 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.

Исходя из изложенного выше, основной силой действующей на загрязнения в процессе очистки поверхности является гидродинамическая сила. 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. [4].

При условии формирования взвеси фрагментов загрязнения обеспечивается перемещение элементарных объемов жидкости указанными пульсациями скоростей  $v'_{oz}$ . Следовательно, сила сопротивления подъему  $F_y$  определяется формулой Стокса :

$$F_y = 3\pi\mu d_p v'_{oz} \quad (4)$$

где:  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $\text{м}^{-1}\cdot\text{кг}\cdot\text{с}^{-2}$ ;  $d_p$  - диаметр частицы, м;  $v'_{oz}$  - скорость поперечной пульсации, м/с.

Тогда для частиц диаметром  $0,1...10\cdot 10^{-6}$  м в керосине (при  $20^\circ\text{C}$   $\mu = 12,8$ ;  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ ) при  $\Delta u = 1,2$  м/с сила сопротивления подъему составит  $1,5\cdot 10^{-5}...1,5\cdot 10^{-3}$  Н. Следовательно, при определенном значении скорости  $v'_{oz}$  (степени турбулизации потока) худшие условия для подъема в потоке будут для крупных и тяжелых частиц взвеси. При ламинарном течении жидкости ( $v'_{oz} = 0$ ) подъем частиц и удержание их в объеме во взвешенном состоянии сильно затруднено.

С учетом этого фактора гидродинамическая составляющая воздействующих сил примет вид

$$\vec{F}_{\text{гидро}} = \vec{F}_x + \vec{F}_y. \quad (5)$$

где:  $\vec{F}_x$  и  $\vec{F}_y$  - векторные составляющие силы по осям  $x$  и  $y$  соответственно.

Сложный профиль сепаратора и принудительное вращение подвижных элементов трибосистемы качения в процессе очистки способствуют образованию турбулентных течений, вместе с тем существенно снижают скорость переноса жидкости на рабочих поверхностях дорожек и тел качения, что ограничивает применение для очистки трибосистем качения от микро- и субмикрзагрязнений гидродинамическое воздействие в качестве основного действующего фактора.

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 [2] отрыву и удалению с из рабочих поверхностей частиц загрязнений ферромагнитной природы.

С учетом этого рассматриваемую систему можно представить совокупностей пар диполей (рис. 3.).

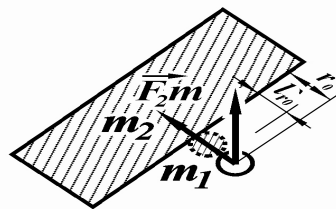


Рис. 3. Магнитное взаимодействие частицы загрязнения ферромагнитной природы с ободкой подшипника

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 будет иметь вид:

$$H = \frac{B}{(\mu_0\mu_m)} = 1,45(\text{А/м}) \quad (6)$$

где:  $\mu_m$  – магнитная проницаемость материала.

Тогда намагніченность будет соответствовать:

$$M_m = \frac{B}{\mu_0} - H = 7956,3(A/m) \quad (7)$$

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:

$$P = M_m \cdot V = ql \quad (8),$$

где  $V$  – объем частицы либо обоймы подшипника,  $q$  – заряд диполя,  $l$  – плечо диполя.

Магнитная сила взаимодействия частицы в поле внутреннего кольца подшипника составит:

$$F_m = \frac{\mu_0 q_1 H}{4\pi} \quad (9)$$

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

1. Отрыв частиц загрязнений размером менее 5 мкм с деталей сложных и затененных рабочих поверхностей, а также удержание их во взвеси моющего раствора крайне затруднено.

2. Причиной снижения эффективности очистки известными методами есть сложный профиль полостей трибосистем качения, затрудняющий удаление частиц микро-, субмикро- и наноуровня.

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

1. Аксьонов О.Ф., Стельмах О.У., Костюнік Р.Є., Куцев О.В. Електромагнітна складова утворення феромагнітних забруднень.//Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ 2006. – Вип.46. – С. 91 – 102.
2. Аксьонов О. Ф., Костюнік Р. Є., Куцев 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.
3. Аксенов А.Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости.– М.: Транспорт., 1965. – 171 с.
4. Белянин П.Н., Данилов В.М. Промышленная чистота машин. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.

Стаття надійшла до редакції 27.05.2013.