

УДК 621.7/9.048.7

ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ТЕЛ КАЧЕНИЯ ПОКРЫТИЕМ ZrN НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОДШИПНИКА

С.Ю. КОТОВ, канд. техн. наук, доц. Г.Я. БЕЛЯЕВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Проведен анализ и осуществлена классификация методов повышения долговечности подшипников качения. Изучено влияние процесса вакуумно-плазменного упрочнения тел качения подшипников покрытием ZrN различной толщины на характеристики долговечности радиально-упорного шарикового подшипника МПЗ 6305. Также проведен анализ причин отказов подшипников испытываемых партий и установлено влияние толщины покрытия на характеристики износа и долговечность испытываемых узлов трения. Выдвинуты предположения, объясняющие положительное воздействие покрытия на увеличение долговечности подшипников.

Введение. Основным методом повышения экономической стабильности Республики Беларусь в настоящее время является развитие конкурентоспособного производства, существование которого в современных рыночных условиях возможно только при использовании высокопроизводительного и надежного технологического оборудования, отвечающего всем современным требованиям охраны труда и экологической безопасности.

Одна из проблем современного машиностроения – повышение долговечности деталей и узлов механизмов. Актуальность проблемы особенно обостряется в связи с постоянным ужесточением условий работы изделий (высокие удельные нагрузки, повышенные температуры, воздействие агрессивных сред, отсутствие или недостаточное количество смазки между трущимися поверхностями и т.д.) и необходимостью экономии дорогостоящих дефицитных металлов и сплавов. На восстановление и изготовление новых деталей затрачиваются значительные материальные и трудовые ресурсы. В этой связи вопрос увеличения работоспособности подшипников качения является, на наш взгляд, одной из наиболее острых проблем, требующих особого внимания.

Проблема недостаточной долговечности узлов трения объясняется низкой стойкостью поверхностного слоя деталей, который в процессе эксплуатации подвергается разрушающим нагрузкам различного рода (истирание, усталостное выкрашивание, абразивное царапание, коррозия и т.д.). Следовательно, для повышения долговечности деталей, особенно работающих в условиях интенсивного изнашивания, решающее значение имеет получение поверхностных слоев с повышенными физико-механическими свойствами.

Анализ литературных источников показал [1 – 8], что методы увеличения долговечности подшипников качения можно разделить на условные группы, представленные на рисунке 1.



Рис. 1. Методы повышения долговечности подшипников качения

В настоящее время **наиболее распространенными методами повышения работоспособности подшипников качения** являются: *применение* новейших смазочных материалов и присадок к ним; *модификация* поверхностного слоя деталей подшипникового узла; *использование* подшипников из новейших материалов в особо тяжелых условиях эксплуатации. Стоит отметить, что наличие у данных методов явных недостатков, таких как высокая стоимость, низкая универсальность, невысокая эффективность и др., не позволила им получить широкого распространения.

Учитывая высокую эффективность применения упрочняющих вакуумно-плазменных покрытий для увеличения работоспособности подшипников скольжения, можно предположить, что использование данного метода применительно к подшипникам качения могло бы значительно увеличить их работоспособность при относительно небольших материальных затратах [9 – 11].

Цель данного научного исследования – определение влияния вакуумно-плазменного упрочнения элементов качения покрытием ZrN на долговечность радиально-упорного шарикового подшипника МПЗ 6305.

Методика исследования. Нанесение покрытия ZrN на тела качения подшипника производили на вакуумно-дуговой установке УРМЗ.279.048 (ОНИ-6-008). В качестве приспособления использовали специальное устройство для нанесения покрытий в вакууме на сферические подложки.

Сравнительные испытания подшипников производили попарно на стенде ВНИПП-III-50-М с гидравлическим нагружением и электромеханическим измерителем момента сопротивления вращению.

Испытания проходили совместно: одна партия серийных радиально-упорных шариковых подшипников 6305 ГОСТ 520-89 производства ОАО «Минский подшипниковый завод» (10 шт.); три партии с упрочненными телами качения: 10 шт. с толщиной покрытия ZrN $h = 1$ мкм; 10 шт. с толщиной покрытия $h = 0,7$ мкм; 10 шт. с толщиной покрытия $h = 0,5$ мкм.

В ходе эксперимента регистрировалась амплитуда вибраций и температура наружного кольца подшипников датчиком термосопротивления методом прямого измерения. Условия испытаний двух партий подшипников выбирались так, чтобы теоретическая расчетная долговечность подшипников находилась в пределах 200...500 часов. Базовый расчетный ресурс для партии подшипников, согласно ГОСТ 18855-94, составил 261 час при частоте вращения внутреннего кольца $n = 0,6 \cdot n_{\max} = 6000 \text{ мин}^{-1}$ и радиальной нагрузке $F_R = 6000 \text{ Н}$. Испытания подшипников производились согласно ГОСТ 28428-90 до появления первичных признаков усталостного разрушения.

Условия смазки: принудительная капельная маслом И40А ГОСТ 20799-88 со скоростью подачи масла в подшипник 3 капли в минуту.

В целях чистоты эксперимента каждая испытуемая группа состояла из подшипников, собранных из деталей одной селективной группы. Величина радиального зазора всех подшипников составила 0,5 мм.

Обсуждение результатов испытаний. Согласно публикациям [12 – 14], применение вакуумно-плазменных покрытий в узлах трения значительно снижает коэффициент трения скольжения. Для установления влияния процесса упрочнения на эффективность работы испытуемых подшипников в ходе эксперимента регистрировалась величина сопротивления вращению вала, на котором были закреплены испытуемые подшипники. Сопротивление вращению без потерь на трение в опорных роликовых подшипниках представлено на рисунке 2.

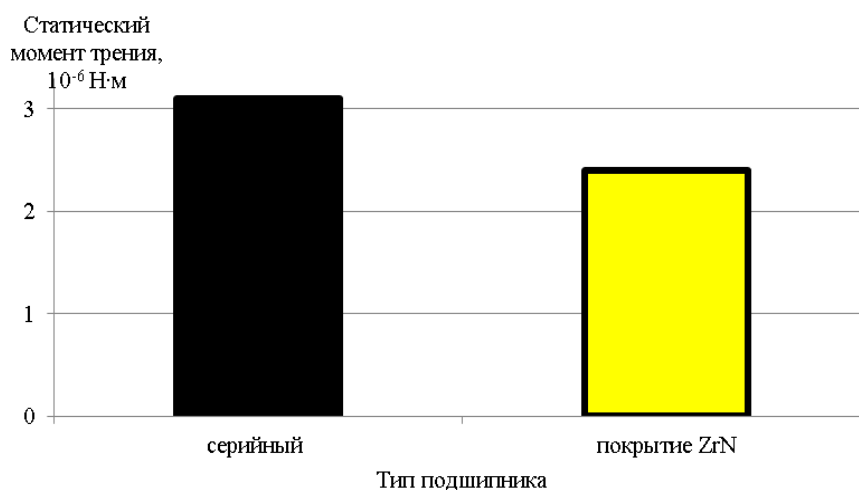


Рис. 2. Сравнительная диаграмма статических моментов трения для партий серийных и упрочненных шариковых подшипников 6305

Предположительной причиной снижения потерь на трение в упрочненных подшипниках стало наличие барьера при молекулярном взаимодействии поверхностей трения, в роли которого выступило покрытие. Подтверждением этого факта стали данные измерения температуры наружного кольца испытываемых подшипников.

Согласно полученным экспериментальным данным, температура упрочненного подшипника в установившемся режиме и в период приработки на 10...15 % меньше, чем у серийного. Этот факт объясняется тем, что во время работы подшипникового узла происходит потеря энергии, затрачиваемой на преодоление силы трения. Учитывая тот факт, что коэффициент трения в паре «PVD-покрытие – сталь ШХ15» несколько ниже, чем в паре трения «сталь ШХ15 – сталь ШХ15», количество тепла, выделяемое упрочненным подшипником в период эксплуатации, будет значительно меньшим.

Для партий серийных и упрочненных подшипников, испытанных на стенде, были определены регламентированные стандартом показатели работоспособности:

- *гарантированная долговечность* – фактическая долговечность в часах, которую превысили 90 % испытываемых подшипников партии при постоянных условиях испытаний с учетом только тех подшипников, которые отказали по признаку усталости металла;

- *средняя долговечность* – среднееарифметическое значение фактической долговечности всех подшипников в партии, определялась согласно формуле (1):

$$h_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}. \quad (1)$$

Гарантированная и средняя долговечность для партий подшипников представлена в виде сравнительных диаграмм на рисунке 3.

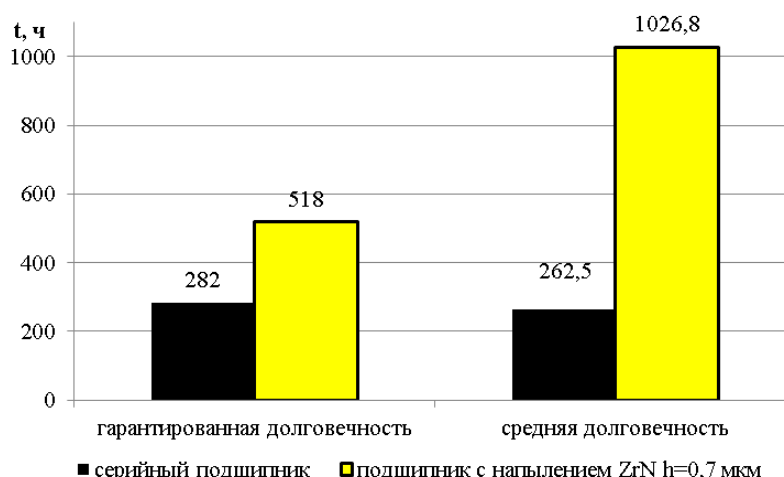


Рис. 3. Диаграммы гарантированной и средней долговечности для серийных и упрочненных шариковых подшипников 6305

- коэффициент рассеяния долговечности вычислялся согласно формуле (2):

$$K_p = \frac{h_{\max}}{h_{\min}}, \quad (2)$$

где h_{\max} – наибольшая долговечность подшипников в партии; h_{\min} – наименьшая долговечность подшипников в партии.

$$K_{R_{\text{серийный}}} = 4,016, \quad K_{R_{\text{упрочненный}}} = 5,21.$$

Относительно небольшое значение коэффициента рассеяния можно объяснить тем, что испытания проходили подшипники одной селективной группы, упрочненные подшипники имели покрытие высокого качества и малой толщины ($h \leq 1$ мкм), непостоянство которой незначительно сказалось на рассеянии результатов стендовых испытаний;

- коэффициент эксплуатационной стойкости – процентное отношение числа подшипников, отработавших срок службы, превышающий расчетную долговечность, к общему числу подшипников в данной партии определялось согласно формуле (3):

$$C_T = \frac{i - i_h}{i} \cdot 100 \% . \quad (3)$$

В каждой партии подшипников единиц, не выстоявших расчетной долговечности, выявлено не было:

$$C_{TC} = C_{TV} = 100 \% .$$

Для определения влияния толщины покрытия на относительное увеличение долговечности подшипников и характеристики износа подшипников качения было произведено сравнение эксплуатационных показателей для каждой партии подшипников.

Зависимость увеличения долговечности упрочненного подшипника (по отношению к средней долговечности, продемонстрированной партией серийных подшипников во время испытаний) в зависимости от толщины упрочняющего покрытия представлена на рисунке 4.

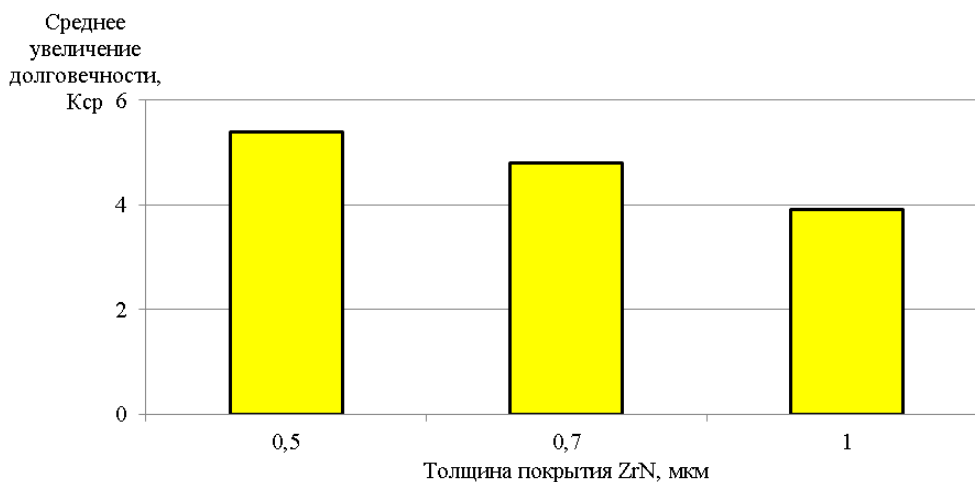


Рис. 4. Зависимость средней долговечности шарикового подшипника 6305 от толщины упрочняющего покрытия ZrN по отношению к средней долговечности серийных образцов

Согласно полученным результатам, наибольшее увеличение долговечности продемонстрировала партия подшипников с толщиной упрочняющего покрытия 0,5 мкм.

По всей видимости, механизм работы напыления, определяемый толщиной покрытия, можно условно разделить на «тонкие» и «толстые».

Тонкие покрытия (применительно к стендовым испытаниям, толщиной 0,5 мкм): основной причиной разрушения покрытия стало его постепенное истирание вследствие трибомеханического взаимодействия поверхностей трения. При таком механизме работы главным параметром покрытия, определяющим его эффективность, является толщина.

С *ростом толщины покрытия* (0,7 и 1 мкм) происходит увеличение внутренних напряжений в слое покрытия. В этом случае основной причиной разрушения покрытия будет являться его отслаивание от подложки. Высокие внутренние напряжения покрытия и его деформирование в результате работы подшипника качения приводят к образованию трещин и отслаиванию крупных фрагментов покрытия, являющихся по своей природе абразивом и оказывающих негативное влияние на долговечность подшипника.

С целью установления влияния покрытий различной толщины на причины отказа подшипников был произведен осмотр испытанных подшипников. Влияние толщины покрытия на причины отказов подшипников проиллюстрировано рисунком 5.

В результате анализа причин отказов подшипников было установлено:

- основной причиной отказов для всех партий подшипников стало усталостное разрушение металла на дорожках качения. Наряду с отсутствием перегрева подшипника в период испытаний и отсутствием разрушений деталей подшипников данный факт свидетельствует об удовлетворительных условиях смазки и допустимых режимах стендовых испытаний подшипников;

- нанесение упрочняющего покрытия малой толщины полностью исключает отказ подшипника по причине усталостного разрушения тел качения;

- нанесение покрытий толщиной порядка 0,5 мкм позволяет сократить число отказов подшипников по причине усталостного разрушения дорожек колец. Видимо, причиной этого явления стала минимальная изнашивающая способность покрытия малой толщины. При больших толщинах покрытия, вследствие высоких удельных напряжений в покрытии, происходит его отслаивание относительно крупными участками. Участки отслоившегося от подложки покрытия, будучи измельченными элементами качения подшипника и обладая высокой микротвердостью, оставаясь в зоне контакта поверхностей, приводят к появлению на поверхностях трения царапин, которые могут стать очагами развития усталостных трещин.

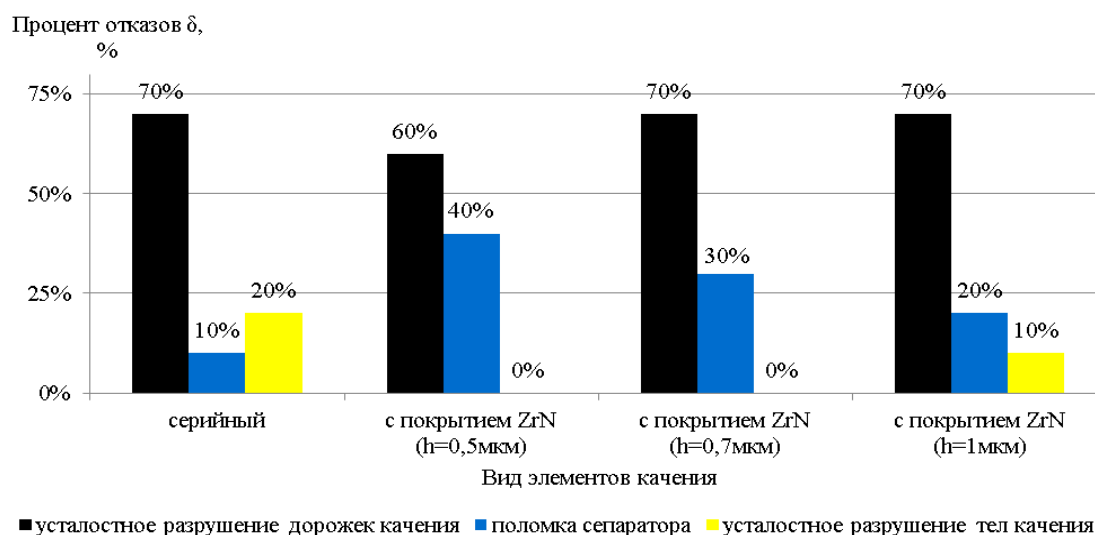


Рис. 5. Диаграмма причин отказов шариковых подшипников

Выводы:

- нанесение *PVD*-покрытия *ZrN* на элементы качения позволяет снизить потери на трение в подшипнике на 30...35 % по сравнению с серийными образцами;

- вакуумно-плазменное упрочнение элементов качения является высокоэффективным способом повышения долговечности и эффективности подшипников. Так, нанесение *PVD*-покрытия *ZrN* толщиной 0,7 мкм позволяет увеличить гарантированную долговечность подшипника 6305 в 2,1...2,2 раза, а среднюю – в 3,5...4 раза по сравнению с серийными образцами;

- одним из факторов, определяющих эффективность работы покрытия, является его толщина: применительно к исследуемым покрытиям, наибольшую работоспособность показали подшипники с покрытиями толщиной 0,5 мкм;

- вакуумно-плазменное упрочнение элементов качения покрытием толщиной 0,5...1 мкм существенно снижает вероятность выхода из строя подшипника вследствие усталостного разрушения шариков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спришевский, А.И. Повышение износостойкости и срока службы подшипников качения / А.И. Спришевский // Теория трения и износа. – 1965. – № 3. – С. 24 – 26.
2. Трение, изнашивание и смазка / И.В. Крагельский [и др.]; под. общ. ред. В.В. Алисиной. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
3. Лазаренко, Ю.А. Способы повышения износостойкости рабочих поверхностей прецизионных шарикоподшипников / Ю.А. Лазаренко, В.Ф. Старостин // Подшипниковая промышленность. – 1979. – Вып. 3. – С. 10 – 13.
4. Герасимов, Н.Н. Исследование волнистости рабочих поверхностей деталей радиальных шарикоподшипников на уровень вибрации / Н.Н. Герасимов, В.В. Суханова // Труды ВНИПП. – 1965. – № 2. – С. 74 – 83.
5. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости / Э.В. Рыжов // Трение и износ. – 1980. – № 1. – С. 147 – 149.

6. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
7. Загута, Н.Ф. Сверхдолговечные подшипники [Электронный ресурс] / Н.Ф. Загута. – Симферополь, 2008. – Режим доступа: <http://zagut.sitcity.ru>. – Дата доступа: 30.01.2013.
8. Герасимов, А.А. Исследование процесса бесцентрового упрочнения и влияние его наследственности на качество рабочей поверхности и долговечность деталей подшипников качения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 08.00.03 / А.А. Герасимов; Саратов. политехн. акад. – Саратов, 1979. – 25 с.
9. Мрочек, Ж.А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий / Ж.А. Мрочек, Б.А. Эйзнер, В.А. Марков. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 95 с.
10. Костюк, Г.И. Физико-технические основы комбинированных технологий напыления покрытий, ионной имплантации, ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения / Г.И. Костюк. – Харьков: АИНУ, 2002. – 1030 с.
11. Behrisch, R. Particle bombardment: Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies / R. Behrisch, W. Eckstein // Springer. – 2007. – № 2. – P. 23 – 26.
12. Исследование характеристик трения и износа ионно-плазменных покрытий, полученных на алюминиевом сплаве / С.Ф. Дудник [и др.] // Физическая инженерия поверхности. – 2004. – № 1. – С. 110 – 114.
13. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
14. Исследование износа вакуумно-плазменных покрытий из TiN при трении по металлическим материалам / А.П. Любченко [и др.] // Трение и износ. – 1983. – № 5. – С. 892 – 897.

Поступила 03.04.2013

EFFECT OF VACUUM-PLASMA HARDENING OF THE ROLLING ELEMENT ZrN COATING FOR LIFE BEARING

S. KOTOV, G. BELYAEV

Analysis and classification methods for improving of durability of rolling bearings, influence the process of vacuum-plasma hardening of the rolling element bearings ZrN coating of varying thickness on the characteristics of durability of angular contact ball bearing, MPZ 6305 are made. Also the analysis of causes of failures of bearings of tested parties is made and the influence of the thickness of the coating on the wear characteristics and durability of test frictional units is established. Hypotheses are presented to explain the positive impact of the coating to increase bearing life.