

ВЛИЯНИЕ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КАЧЕНИЯ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОДШИПНИКА

Асп. КОТОВ С. Ю., канд. техн. наук, проф. БЕЛЯЕВ Г. Я.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: kotov_serгей09@mail.ru

INFLUENCE OF ROLLING ELEMENT VACUUM-PLASMA STRENGTHENING ON BEARING LIFE

KOTOV S. Yu., BELYAEV G. Ya.

Belarusian National Technical University

Изучены условия работы радиально-упорного шарикового подшипника МПЗ 6305 в автопогрузчиках и установлены характеристики его износа в условиях эксплуатации. Проведено исследование влияния вакуумно-плазменного покрытия ZrN на характеристики долговечности подшипника. Установлено, что применение данного покрытия существенно уменьшает вероятность коррозии тел качения подшипников, практически полностью снижает их абразивный износ и истирание. В ходе испытаний была установлена зависимость эксплуатационных характеристик упрочненных подшипников от толщины покрытия.

Ключевые слова: вакуумно-плазменное упрочнение, элемент качения, подшипник.

Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 6 назв.

The paper investigates operational conditions of angular contact ball bearing МПЗ 6305 in automatic loaders and presents characteristics of its run-out due to usage conditions. An influence of vacuum plasma coating ZrN on bearing life characteristics has been researched in the paper. It has been established that an application of the mentioned coating significantly reduces the probability of bearing rolling elements corrosion, practically excludes their abrasive wear and tear. Test investigations have made it possible to determine dependence of operational characteristics of strengthened bearings on coating thickness.

Keywords: vacuum-plasma strengthening, rolling element, bearing.

Fig. 3. Tab. 1. Ref.: 6 titles.

Повышение надежности машин и механизмов – важнейшая задача народного хозяйства Республики Беларусь. Для ее решения необходимо увеличить работоспособность лимитирующих узлов и деталей. Это особенно важно для изделий, работающих в агрессивных средах, вакууме, при трении в условиях ограниченного доступа смазывающих материалов, при высоких удельных нагрузках и др.

Наиболее оптимальным решением данной задачи, по мнению авторов, является формирование на рабочих поверхностях деталей покрытий, которые благодаря оптимальному сочетанию технологических, конструктивных и эксплуатационных параметров могут обеспечить получение изделий с требуемыми и прогнозируемыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Анализ методов формирования износостойких покрытий, а также результаты экспериментальных исследований показывают, что наиболее перспективным для этих целей может быть вакуумно-плазменный способ.

Особенно широкое применение вакуумно-плазменных покрытий для увеличения долговечности узлов трения (поршневых колец двигателей внутреннего сгорания, плунжерных пар и др.) наблюдалось в последнее десятилетие [1–3]. Существенное увеличение ресурса работы подшипников скольжения за счет нанесения вакуумных покрытий на их вкладыши привело к внедрению данной технологии в серийное и массовое производство ведущих мировых автомобилестроительных компаний, таких как Audi, MAN, Mercedes-Benz и др. [4]. Однако ввиду технологических особенностей нанесения покрытий в вакууме на детали сложной конфигурации до сих пор не разработан вопрос влияния вакуумных покрытий на долговечность подшипников качения.

Целью научного исследования авторов стало изучение влияния нанесения вакуумно-плазменных покрытий на долговечность подшипника МПЗ 6305.

Методика исследования. Нанесение покрытия ZrN производили на установке вакуум-

но-дугового напыления «Булат». В качестве приспособления использовали специальное устройство для нанесения покрытий в вакууме на сферические подложки. Перед нанесением покрытия шарики были обезжирены бензином «Калоша» (ГОСТ 443–76) и техническим этиловым спиртом (ГОСТ 17299–78). Перед нанесением покрытия поверхность дополнительно подвергали предварительной подготовке в виде ионной бомбардировки ионами жесткого металла.

Время нанесения покрытия выбирали из соображений формирования покрытий с толщиной 0,1–1,0 мкм. Фотографирование поверхности тел качения производили на комплексе микро- и макроанализа на базе микроскопа ПЛАНАР МКИ2М с увеличением $\times 64$. Для определения изменения размера шаров подшипника выполняли измерения их диаметров кругломером Roundtest 114, шероховатости – на приборе Taly-Surf. Величину износа колец подшипника определяли по диаметрам дорожек качения на приборе для измерения внутренних диаметров УД-2В с двумя измерительными головками пружинного типа ИИГПВ с точностью 1 мкм.

Учитывая радиальное биение колец подшипников, возможное рассеяние номинальных размеров составило ± 2 мкм. Частота вращения внутреннего кольца исследуемых подшипников $n = 350 \text{ мин}^{-1}$. Базовый расчетный ресурс для партии подшипников МПЗ 6305, согласно ГОСТ 18855–94, при заданных условиях эксплуатации составил 1630 ч.

Для изучения влияния толщины данного покрытия на эксплуатационные характеристики подшипников испытания проводили совместно для одной партии серийных подшипников производства ОАО «Минский подшипниковый завод» и пяти партий с телами качения, упрочненными покрытиями с толщиной 1,0; 0,7; 0,5; 0,3 и 0,1 мкм. Испытывали партии подшипников по 10 шт. для каждой толщины покрытия.

Эксплуатационные испытания проводили для пяти подшипников из каждой партии, вторые половины партий использовали для измерения величины изнашивания деталей подшипника после 2000 ч эксплуатации и подвергали демонтажу до появления признаков выхода из строя (данное время работы подшипника являлось средней эксплуатационной долговечностью для серийных образцов).

В целях чистоты эксперимента каждая испытываемая группа состояла из подшипников, собранных из деталей одной селективной группы. Величина радиального зазора всех подшипников после монтажа составила $\Delta = 0,5 \text{ мм}$.

Обсуждение результатов испытаний. Анализ заводских подшипников не выявил брака и отклонений от рекомендуемых условий хранения. Кроме того, было установлено, что радиально-упорный подшипник МПЗ 6305 работает с соблюдением всех условий нагружения и скоростного режима.

Для определения причин выхода подшипника серийных подшипников из строя было проведено исследование поверхности тел качения подшипников под микроскопом. Результаты исследования поверхности тел качения подшипника в различные периоды эксплуатации представлены на рис. 1.

Согласно полученным результатам исследования поверхности элементов качения, было установлено, что в период эксплуатации подшипника происходит изменение шероховатости шариков, причем особенно интенсивно данный процесс протекает в начальный период эксплуатации: на поверхностях тел качения было зафиксировано наличие множества рисок, царапин и других мелких дефектов (рис. 1а). Причиной изменения шероховатости поверхности элементов качения на более поздних стадиях эксплуатации, по мнению авторов, послужили процессы изнашивания: абразивный, усталостный и т. д. [5].

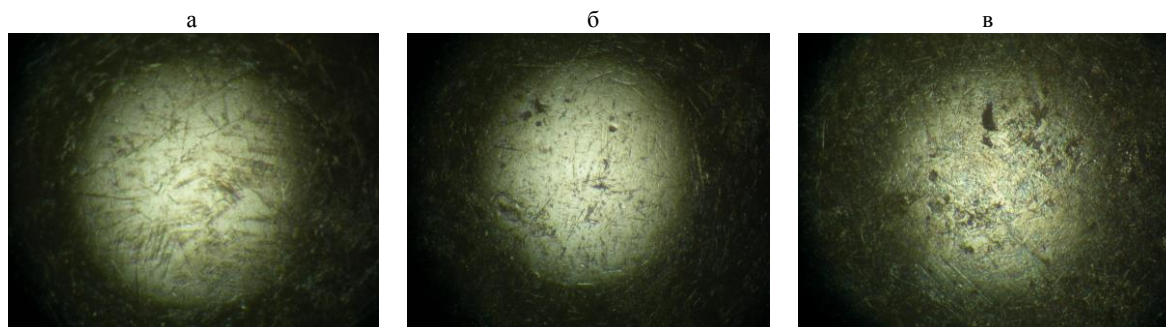


Рис. 1. Состояние поверхностного слоя тел качения подшипника МПЗ 6305 на стадиях эксплуатации ($\times 64$): а – после трех дней эксплуатации; б – после второго месяца эксплуатации; в – после выхода подшипника из строя

Помимо прочего, на телах качения подшипников, спустя восемь-десять недель эксплуатации, было визуально зафиксировано зарождение очагов коррозии (рис. 1б). Предположительной причиной данного явления могли стать наличие влаги в смазывающем материале, содержание в воздухе агрессивных химических элементов и их соединений, а также наличие определенного электрического потенциала в узле трения.

На поверхности тел качения подшипников, прошедших полный период эксплуатации, были выявлены признаки усталостного разрушения, такие как рытвины и круговые язвы (рис. 1в). Зачастую в углублениях, образовавшихся в результате усталостного разрушения тел качения, наблюдалось зарождение очагов коррозии. Условия смазки подшипника: узел трения заполнялся пластичной смазкой после монтажа, а также периодически в соответствии с регламентом во время технического обслуживания и ремонтов.

Подводя итог вышесказанному, можно утверждать, что при эксплуатации радиально-упорного подшипника в условиях периодической смазки на поверхностях контакта происходит совместное действие таких видов износа, как усталостный, абразивный, коррозионный и механическое истирание. Для решения вопроса увеличения срока службы исследуемого узла трения было изучено влияние вакуумно-плазменного упрочнения тел качения подшипника покрытиями из тугоплавких металлов и их соединений на долговечность подшипника в заданных условиях эксплуатации. Исходя из обзора научных публикаций на данную тематику, в качестве упрочняющего покрытия было решено исследовать влияние на долговечность подшипников качения вакуумно-плазменного покрытия ZrN как покрытия, обладающего оптимальным сочетанием свойств [6].

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 рис. 2.

Согласно полученным результатам, наибольшее увеличение долговечности продемонстрировала партия подшипников с толщиной

упрочняющего покрытия 0,7 мкм. Из чего следует, что особенности работы напыления определяются его толщиной. Так, покрытия в зависимости от толщины можно условно разделить на тонкие и толстые.

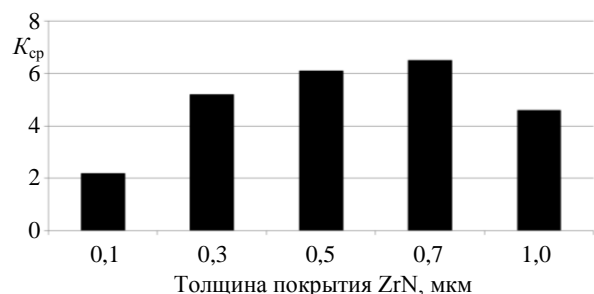


Рис. 2. Зависимость увеличения долговечности шарикового подшипника МПЗ 6305 от толщины упрочняющего покрытия ZrN по отношению к средней долговечности серийных образцов

Тонкие покрытия (применительно к эксплуатационным испытаниям, толщиной $<0,7$ мкм): основной причиной разрушения покрытия стало его постепенное истирание вследствие механического взаимодействия поверхностей трения. Ресурс работы покрытия в случае применения тонких пленок находится в прямой зависимости от их толщины.

С ростом толщины покрытия ($\geq 0,7$ мкм) происходит увеличение внутренних напряжений в слое покрытия. В этом случае значительно возрастает вероятность отслаивания покрытия от подложки. Высокие внутренние напряжения покрытия и его деформирование в результате работы подшипника качения приводят к образованию трещин и отслаиванию фрагментов покрытия, являющихся по своей природе абразивом и оказывающих негативное влияние на долговечность подшипника. Ресурс работы покрытия в случае применения толстых пленок обратно пропорционален их толщине.

Для установления влияния толщины напыления на сопротивляемость тел качения различным видам изнашивания проведено визуальное исследование состояния поверхности тел качения подшипников после эксплуатации (табл. 1). Как следует из табл. 1, покрытия с малой толщиной ($\leq 0,3$ мкм) в ходе эксплуатации подшипника были изношены в разной степени (о чем свидетельствовало изменение цвета поверхности), в результате чего на незащищенных участках округлой формы происходило зарождение очагов коррозии различ-

ной величины. Однако на тонких пленках отсутствуют признаки какого бы то ни было отслоения покрытия. На покрытиях толщинами $\geq 0,7$ мкм при отсутствии следов истирания покрытия есть следы его отслоения, в местах которых происходило зарождение и развитие очагов коррозии.

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод о том, что наилучшей сопротивляемостью различным видам износа обладают покрытия толщинами 0,5–0,7 мкм.

Известно, что изменение размеров деталей подшипников, особенно тел качения, оказывает негативное влияние на точностные параметры узла трения, что, в свою очередь, приводит к снижению эффективности его работы, увеличению шума, вибраций и, как следствие, к уменьшению долговечности подшипникового узла. С целью определения влияния вакуумно-плазменного упрочнения тел качения на линейный показатель износа деталей подшипника было произведено измерение диаметров серийных и упрочненных шариков и колец до и спустя 2000 ч эксплуатации подшипников. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Согласно результатам измерений, изменение диаметра тел качения после эксплуатации у серийных подшипников находилось в диапазоне 4–9 мкм, а изменение диаметра дорожек качения составило 5–7 мкм. Предположительно, на изменение диаметров деталей подшипника в данной стадии эксплуатации оказывают совместное влияние процессы поверхностного пластического деформирования (наклепа) и изнашивания различных видов (истирание, абразивное изнашивание, коррозия). Изменение диаметров упрочненных тел качения за тот же период эксплуатации находилось в диапазоне 0,2–3,0 мкм, а изменение диаметров дорожек качения внутренних, работавших с ними в паре, составило 3,0–5,0 мкм.

Изменение диаметров дорожек качения упрочненных подшипников происходит по следующим принципам:

- при нарушении целостности покрытия (по причине его недостаточной толщины) скорость изменения линейных размеров вследствие отсутствия межмолекулярного барьера увеличивается до значения, характеризующего работу серийных образцов;

Таблица 1

Влияние толщины вакуумно-плазменного покрытия ZrN на виды износа элементов качения подшипника МПЗ 6305

Признак износа	Толщина покрытия ZrN на телах качения h , мкм				
	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
Истирание покрытия	Полное	На большей части поверхности	На незначительной части поверхности	–	–
Отслоение покрытия	–	–	–	2–5 % поверхности	До 10 % поверхности
Очаг коррозии	Скопление очагов различной величины	Очаги различной величины	Единичные мелкие очаги	Очень редкие очаги различной величины	Единичные очаги различной величины на местах отслоения покрытия

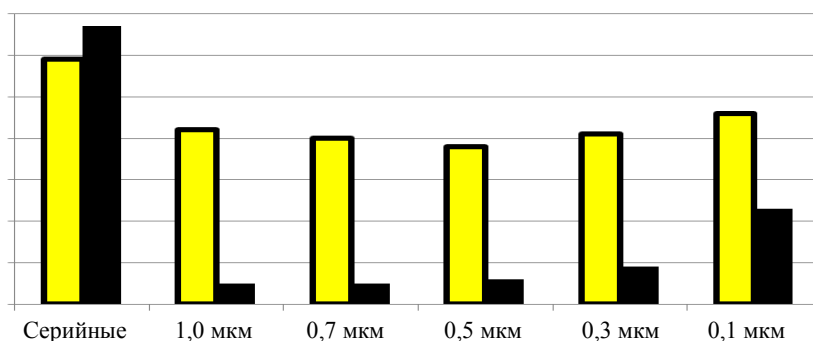


Рис. 3. Изменение среднего диаметра деталей подшипника МПЗ 6305 после 2000 ч эксплуатации для:
■ – дорожки качения внутреннего кольца; ■ – шарика

• в случае высоких удельных напряжений в покрытии, вызванных его избыточной толщиной, происходит отслоение достаточно многих фрагментов покрытия с их последующим измельчением, вызванным особенностями работы узла трения. В данном случае наличие в зоне трения частиц определенного размера с высокой микротвердостью приведет к ярко выраженному абразивному воздействию на детали подшипника (кольца и сепаратор). Предположительно, на ресурс работы сепаратора данное явление будет оказывать негативное влияние.

Стоит подчеркнуть, что при толщинах покрытия 0,5–0,7 мкм продукты его изнашивания, представляющие собой мелкодисперсные частицы, не оказывают существенного влияния на картину трения, а целостность барьера, препятствующего межмолекулярному взаимодействию поверхностей, позволяет уменьшить вероятность их схватывания и, как следствие, износ деталей подшипника.

ВЫВОДЫ

Вакуумно-плазменное упрочнение элементов качения является высокоэффективным способом повышения долговечности подшипников. Так, нанесение вакуумно-плазменного покрытия ZrN позволяет увеличить среднюю долговечность подшипника МПЗ 6305, работающего в условиях совместного воздействия различных видов износа и ограниченной смазки, в пять-шесть раз.

Одним из факторов, определяющих эффективность работы покрытия, является его толщина. Оптимальная толщина покрытия для каждого случая определяется особенностями процесса трения. В качестве универсальной толщины покрытия, применяемой при массовом упрочнении подшипников, можно рекомендовать значения 0,1–0,3 мкм.

Высокая износостойкость покрытия и низкая изнашивающая способность по отношению к контртелу (кольцам подшипника, сепаратору) вакуумно-плазменного покрытия ZrN способствуют более медленному изменению точностных параметров деталей узла трения по сравнению с серийными подшипниками. Так, нанесение PVD-покрытия ZrN толщиной 0,5–0,7 мкм позволяет уменьшить изменение среднего диа-

метра дорожки качения внутреннего кольца на 40–60 %, а среднего диаметра тел качения – в 10–15 раз по сравнению с серийными образцами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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.
2. **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.
3. **Подшипники** скольжения [Электронный ресурс] / Официальный сайт фирмы MAHLE. – Минск, 2009. – Режим доступа: http://www.mahle-aftermarket.com/MAHLE_Aftermarket_EU/ru/Products-and-Services/Engine-components/Bearings. – Дата доступа: 30.05.2013.
4. **Подшипники** качения: справ. пособие / Н. А. Спицын [и др.]; под общ. ред. Н. Ю. Благодклонова. – М.: Машгиз, 1961. – 828 с.
5. **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
6. **Котов, С. Ю.** Влияние сквозной пористости PVD-покрытия ZrN на коррозионную стойкость сферических подложек из стали ШХ15 / С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2013. – № 2. – С. 64–70.

REFERENCES

1. **Dudnik, S. F., Liubchenko, A. P., Oleinik, A. K., Saganovich, A. V., & Saganovich, V. V.** (2004) Investigation of Friction and Wear Characteristics of Coatings Obtained on Aluminium Alloy. *Fizicheskaya Inzheneria Poverkhnosti [Physical Surface Engineering]*, 1, 110–114.
2. **Liubchenko, A. P., Matsevityi, V. P., Bakakin, G. N., Beresnev, V. M., & Oleinik, A. K.** (1983) Investigation of TiN Vacuum-Plasma Coatings Wear Due to Friction Against Metal Materials. *Trenie i Izнос [Friction and Wear]*, 5, 892–897.
3. **Podzhipniki Skol'zheniia [Friction Bearings]** Available at: http://www.mahle-aftermarket.com/MAHLE_Aftermarket_EU/ru/Products-and-Services/Engine-components/Bearings (accessed: 30.05.2013).
4. **Spitsyn, N. A., & Blagosklonov, N. Yu.** (1961) *Anti Friction Bearings: Reference Manual*. Moscow: Mashgiz.
5. **Kragelsky, I. V., Dobychin, M. N., & Kombalov, V. S.** (1977) *Calculation Principles for Friction and Wear*. Moscow: Mashinostroenie.
6. **Kotov, S. Yu., & Beliaev, G. Ya.** (2013) Influence of through porosity of ZrN PVD-Coating on Corrosion Resistance of Spherical ШХ15-steel Base Layer. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta [Bulletin of Belarusian-Russian University]*, 2, 64–70.

Поступила 22.07.2013