

## ВЛИЯНИЕ PVD-ПОКРЫТИЯ TiN НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

С.Ю. Котов, Г.Я. Беляев

УДК 621.7/9.048.7

### РЕФЕРАТ

*С целью определения влияния процесса нанесения вакуумно-плазменных покрытий на эксплуатационные характеристики подшипников качения в данной статье было изучено влияние нанесения покрытия TiN на геометрические характеристики (овальность, разноразмерность, гранность и т. д.) тел качения радиально-упорного шарикового подшипника МПЗ 6305. Изучено влияние процесса нанесения покрытия на шероховатость и волнистость сферических подложек. Также проведены сравнительные испытания подшипников и установлено влияние процесса вакуумно-плазменного напыления тел качения на шумовые и вибрационные характеристики подшипника.*

### ABSTRACT

*In order to determine the effect of the application of vacuum-plasma coatings on the service properties of the bearings the effect of TiN coating on the geometric characteristics (roundness, different size, facetness etc.) of the rolling elements of the angular contact ball bearing MPZ 6305 is studied in this paper. The influence of the coating on the surface roughness and waviness of spherical substrates is studied. Also, comparative trials of bearings are conducted and the influence of vacuum plasma spraying of the rollers on the noise and vibration characteristics of the bearing is established.*

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение долговечности подшипников качения – важнейшая задача, решение которой позволит повысить производительность машин, их качественные характеристики, обеспечить экономию материальных ресурсов и сократить время простоев оборудования.

Наличие трещин различного происхождения, пор, дислокаций, включений прокатной окалины и других дефектов на рабочих поверхностях является основной причиной образования особого вида коррозии в виде язв и открытых полостей, получившей название питтинг (от англ. pit – покрываться ямками). Особенностью питтинговой коррозии подшипников качения является их повышенные шумо- и виброактивность, особенно ярко проявляющиеся при работе на повышенных скоростных режимах в результате смещения геометрического центра элементов качения от их центра масс и сопровождающиеся повышенным износом контактирующих поверхностей и преждевременным выходом подшипников из строя [1].

Одним из наиболее перспективных путей повышения долговечности подшипников является нанесение на поверхности тел качения покрытий

из тугоплавких соединений, которые уменьшают трение и износ контактирующих поверхностей, а также служат диффузионным барьером, препятствующим схватыванию контактирующих тел при высоких контактных нагрузках [2 – 3].

Несмотря на преимущества метода вакуумно-плазменного упрочнения подшипников по сравнению с другими, процесс упрочнения тел качения сферической формы этим способом долгое время представлялся трудноосуществимым по причине наличия у шара только одной поверхности, являющейся одновременно и базовой и обрабатываемой. Ко всему прочему: для получения постоянной толщины покрытия необходимо придать сферической подложке равномерное вращение в вакуумной камере вокруг трех взаимно перпендикулярных осей одновременно. [4 – 5]. Для решения этого вопроса сотрудниками Белорусского национального технического университета разработан ряд приспособлений, защищенных авторскими свидетельствами, для нанесения вакуумных покрытий на магнитные и немагнитные тела качения. Отличительной чертой этих устройств является обеспечение многоосевого вращения шаров в процессе напыления

с целью получения равномерного по толщине и характеристикам покрытия.

#### МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления влияния процесса вакуумно-плазменного упрочнения тел качения на их геометрические характеристики был исследован процесс нанесения покрытия TiN толщиной 3 мкм на партию шариков номинального диаметра  $d = 11,509$  мм однорядного радиального подшипника серии 6305. Материал шаров – ШХ15, твердость 62...64 HRC. Количество шариков в партии – 100 штук.

Для определения точностных характеристик шаров, согласно ГОСТ 3722–81, были исследованы следующие показатели отклонения от круглости: овальность, гранность, разноразмерность, а также волнистость и шероховатость.

Для определения величины отклонения от круглости и разноразмерности шаров производили измерения диаметров кругломером Roundtest – 114. Овальность шаров исследовалась последовательным измерением диаметров шаров через каждые  $45^\circ$  в трех взаимноперпендикулярных плоскостях; огранка – через  $120^\circ$ . Измерение волнистости выполняли на приборе Talyrond-73. Измерение шероховатости выполняли на приборе Taly-Surf.

Перед нанесением покрытия шарики были обезжирены бензином «Калоша» ГОСТ 443–76 и техническим этиловым спиртом ГОСТ 17299–78.

Напыление производили на вакуумно-дуговой установке УРМЗ.279.048 (ОНИ–6–008). В качестве приспособления использовали устройство для нанесения покрытий в вакууме на сферические подложки.

Поверхность шаров перед нанесением напыления для очищения от остатков органических загрязнений и окисных пленок подвергали ионной бомбардировке ионами титана. Технологические параметры процесса: ток дуги  $I_d = 90$  А, величина опорного напряжения  $U = 1000$  В, ток фокусирующей катушки  $I_\phi = 1$  А, время очистки  $t = 180$  с. После нее наносили промежуточный подслой титана для повышения прочности сцепления покрытия с основой и формирования диффузионного барьера между ними. Затем в вакуумную камеру напускался азот повышенной степени очистки и происходило непосредственное формирование покрытия из нитрида титана.

Технологические параметры процесса напыления: ток дуги  $I_d = 90$  А, величина опорного напряжения  $U = 150$  В, ток фокусирующей катушки  $I_\phi = 1$  А, давление реакционного газа  $P = 2,5 \cdot 10^{-1}$  Па. Время нанесения покрытия выбиралось из соображений формирования покрытия толщиной  $h = 3$  мкм. Частота вращения стола приспособления  $n = 4$  мин<sup>-1</sup>.

Испытания на шум и вибрацию производились согласно ГОСТ 27164–86 в звукометрическом помещении размером, соответствующим ГОСТ 15242-2004. Измерения колебаний радиально-упорного подшипника 6305 ГОСТ 8338-86 с упрочненными телами качения осуществляли при частоте оборотов  $n = 5000$  мин<sup>-1</sup> и нагрузке 5000 Н. Шумы измеряли в диапазоне 10...20000 Гц анализатором спектра АССИСТЕНТ СИУ 30 ГОСТ 17187–81. Спектр шумов записывался в формате .mp3 со скоростью 64 бит/сек. Запись спектра шумов производилась синхронно с трех датчиков, расположенных с торца вала, на котором был установлен испытуемый подшипник, на расстоянии 20 см от него. Запись спектра вибраций производилась с датчика, закрепленного на испытательном щите установки, фиксировалась частотная и амплитудная характеристика шумов. Перед началом испытаний было произведено пятикратное измерение шумов установки, затем при заданном числе оборотов и нагрузке производились испытания стандартного и упрочненных подшипников.

При помощи цифрового аудиоредактора SONY Sound Forge из записи испытаний подшипников был выделен спектр колебаний испытуемых подшипников путем наложения на запись фильтра, состоящего из спектра колебаний установки. Очистка записи от частичных фрагментов и случайных гармоник производилась вручную.

Измерение уровня воздушного шума подшипника производили на универсальном приборе для сравнительного измерения шумовых и вибрационных характеристик подшипников качения.

#### СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения шероховатости и отклонений от круглости шаров до и после нанесения напыления (с учетом его толщины) представлены в виде диаграмм на рисунках 1 – 5.

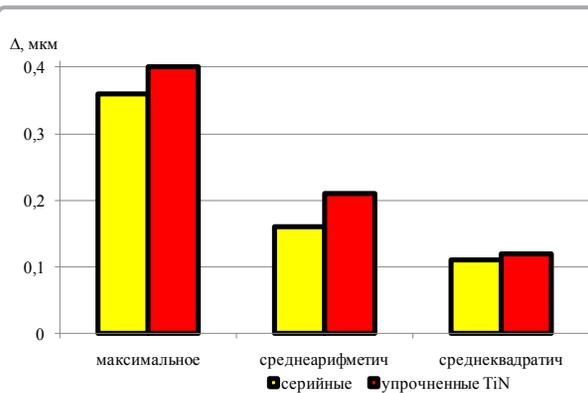


Рисунок 1 – Сравнительная диаграмма отклонений формы шаров до и после процесса нанесения слоя TiN

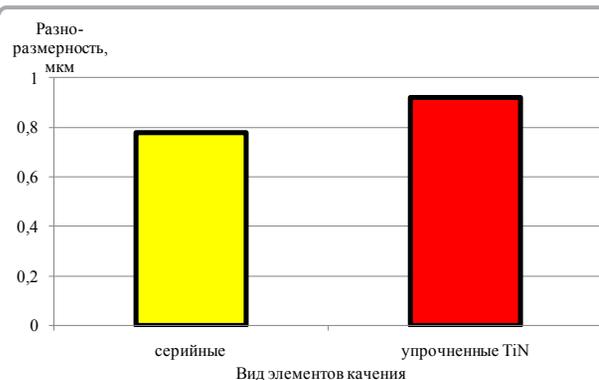


Рисунок 3 – Сравнительная диаграмма величины разноразмерности партии шаров перед и после нанесения TiN

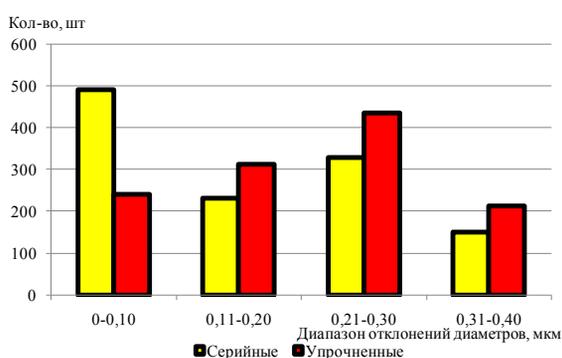


Рисунок 2 – Диаграмма частоты отклонения диаметров шаров от номинала перед и после процесса нанесения TiN

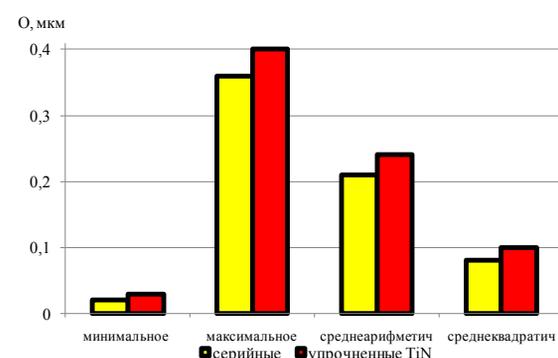


Рисунок 4 – Сравнительная диаграмма величины овальности шаров перед и после процесса нанесения слоя TiN

Как следует из полученных результатов, процесс нанесения покрытий на тела качения несколько ухудшает их геометрические характеристики, в частности: отклонение формы шаров, разноразмерность и овальность.

Одним из определяющих показателей качества поверхности, оказывающих существенное влияние на характеристики долговечности подшипников качения, является волнистость поверхностей трения.

Сравнительные результаты измерения волнистости поверхности тел качения представлены на рисунке 5.

Для определения влияния погрешностей формы тел качения на характеристики подшипников качения было произведена сборка радиально-упорного подшипника МПЗ 6305 с упрочненными телами качения, а также были произведены сравнительные испытания на определение воздушного шума и уровня вибраций серийных и упрочненных образцов.

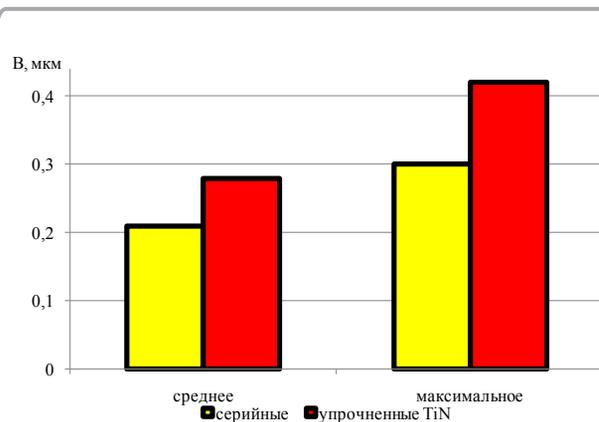


Рисунок 5 – Сравнительная диаграмма изменения показателей волнистости поверхности элементов качения до и после процесса нанесения покрытия TiN

Общий вид подшипника МПЗ 6305 с упрочненными элементами качения представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Радиальный подшипник 6305MPZ с упрочненными элементами качения (PVD-покрытие TiN)

Схема универсального привода для сравнительного измерения шумовых и вибрационных характеристик подшипников качения представлена на рисунке 7.

Привод для испытаний представляет собой электрический привод со шпинделем на масляных подшипниках скольжения, установленный на массивном столе. Исследуемый подшипник качения насаживается внутренним кольцом на сменную разжимную цангу, а его наружное кольцо зажимается специальными сменными упругими дисками, на которых находятся вибродатчики. По оси шпинделя на расстоянии

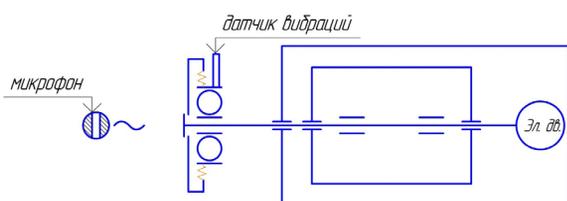


Рисунок 7 – Схема универсального привода для сравнительного измерения шумовых и вибрационных характеристик подшипников качения

0,3 м от испытуемого подшипника на специальной подставке установлен микрофон. Привод имеет двойной контур защиты от шума внутренних узлов.

Результаты сравнительных испытаний на шум при различных частотах вращения внутреннего кольца для серийного подшипника и с упрочненными элементами качения представлены на рисунке 8.

Полученные сравнительные результаты измерения воздушного шума и уровня вибраций подшипников свидетельствуют о незначительной роли погрешностей в работе подшипников: так, различия в уровне шума и вибраций проявляются только при частоте вращения, близкой к максимальному каталожному значению, которая в реальных условиях эксплуатации встречается крайне редко.

По всей видимости, увеличению шума послужили следующие причины:

- изменение геометрической точности тел качения;
- так как нанесение покрытий на тела качения существенно снижает потери на трение в узле, следовательно существует возможность того, что угловая скорость упрочненных подшипников на испытательном стенде была выше того

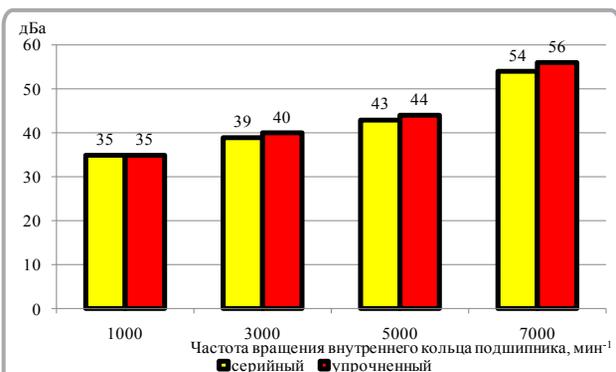


Рисунок 8 – Диаграмма зависимости воздушного шума подшипника 6305 от частоты внутреннего кольца для серийного и упрочненного подшипников

же показателя для серийных подшипников;

– при значительных угловых скоростях возможно возникновение дополнительного вращения тел качения вокруг временной оси, что также оказывает значительное влияние на общую картину шума.

Стоит также отметить, что различие в шуме упрочненного и серийных подшипников малы настолько, что все испытываемые подшипники соответствуют требованиям, предъявляемым к подшипникам.

#### ВЫВОДЫ

1. Процесс вакуумно-плазменного упрочнения тел качения подшипников нитридом титана несколько ухудшает геометрические харак-

теристики поверхности: незначительно влияет на погрешность формы, овальность, гранность, разноразмерность и, в большей степени, на показатели средней и максимальной волнистости шаров. Это можно объяснить отсутствием равномерного принудительного вращения шаров в процессе напыления, обеспечивающего равномерность многоосевого вращения последних и погрешностью формы неупрочненных тел качения (в рассмотренном примере тела качения до и после упрочнения по всем показателям соответствуют шарам подшипников качения 1-го класса точности.

2. Среднеарифметическое отклонение профиля Ra упрочненных шаров по сравнению с изначальной увеличился с 0,4 до 0,5 мкм, что можно объяснить наличием капельной фазы в потоке расплавленного металла и спецификой процесса получения покрытия. Уменьшение капельной фазы возможно при применении сепараторов различной конструкции, наличие которых в стандартной комплектации установок вакуумно-плазменного напыления не предусмотрено.

3. Погрешности, полученные телами качения вследствие нанесения покрытия, проявляются на высоких частотах шума и вибраций, однако подшипник с упрочненными телами качения соответствует временным допустимым нормам для шума и вибраций.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Спицын, Н. А. Подшипники качения : справочное пособие / Н. А. Спицын [и др.] ; под общ. ред. Н. Ю. Благосклонова. – Москва : Машгиз, 1961. – 828 с.
2. Друянов, Б. А. Исследование скольжения сферы по пластически деформируемому полупространству / Б. А. Друянов, Н. М. Михин // Склеометрия. – 1968. – № 1. – С. 68–74.
3. Дунин-Барковский, И. В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – Москва : Машиностроение, 1978. – 232с.
4. Мрочек, Ж. А. Основы технологии формирования многокомпонентных вакуумных электродуговых покрытий / Ж. А. Мрочек, Б. А. Эйзнер, В. А. Марков. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 95с.
5. 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.

Статья поступила в редакцию 28.06.2013 г.