

УДК 621.793

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ НИТРИДА ХРОМА**<sup>1)</sup> Сагдолдина Ж.Б., <sup>1)</sup> Ботабаева Г.Б., <sup>2)</sup> Степанова О.А., <sup>1)</sup> Жанимхан Е.<sup>1)</sup> *Восточно-Казахстанский государственный университет им. С.Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан*<sup>2)</sup> *Государственный университет им. Шакарима города Семей, Семей, Казахстан*

С целью определения влияния покрытия  $\text{Cr}_2\text{N}$  на эксплуатационные характеристики подшипников качения в данной работе были изучены трибологические и коррозионные характеристики тонкопленочных покрытий, полученных методом МС. Трибологические характеристики покрытий изучались по схеме «шар-диск» до и после нанесения покрытия  $\text{Cr}_2\text{N}$ . В качестве контртела применялся шарик из стали ШХ15 (без покрытия). Анализ поперечных сечений дорожек износа после испытаний свидетельствует о том, что после нанесения покрытий износ фактически отсутствует. Образец с покрытием обладает коэффициентом трения 0,14–0,17, т.е. не превышает значение коэффициента трения ( $<0,2$ ) предъявляемое к материалам в сухих парах трения. Методом потенциометрии была определена коррозионная стойкость стали ШХ15 до и после нанесения тонкопленочного покрытия  $\text{Cr}_2\text{N}$ . Коррозионные испытания проводили на потенциостате-гальваностате Р150, в 4% растворе азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ). Результаты испытания показали, что после нанесения покрытия  $\text{Cr}_2\text{N}$  скорость коррозии составила 0,191 см/год, т.е. в два раза меньше по сравнению со сталью ШХ15 без покрытия.

**ВВЕДЕНИЕ**

Долговечность машин и механизмов во многом определяется износостойкостью применяемых в их конструкции подшипниковых узлов. 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 [1].

Подшипники качения применяются в различных условиях эксплуатации. Если обеспечивается смазка подшипников качения, то обычно без проблем может быть достигнут их нормальный расчетный срок службы. Однако при плохих или граничных условиях смазки режим работы подшипников качения является менее благоприятным. В таких случаях образование масляной пленки может оказаться невозможным, что имеет результатом непосредственный контакт металлических поверхностей тел качения и колец и, таким образом, приводит к изнашиванию при заедании, как, например, коррозионно-механическому изнашиванию, и к преждевременному выходу из строя. Вследствие этих явлений намного уменьшается срок службы при плохих условиях смазки. Для смягчения этой проблемы были предприняты попытки использовать твердые покрытия на деталях подшипников, например, покрытия, содержащие карбид или нитрид (например,  $\text{TiN}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{CrN}$ ), а также твердые смазочные материалы, как, например, дисульфид молибдена.

С целью снижения коэффициента и улучшения физико-механических характеристик покрытий бинарных систем ( $\text{TiN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{AlN}$  и др.) в их состав добавляют дополнительные легирующие элементы ( $\text{Si}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Cr}$  и др.) [2]. Наличие в многокомпонентных

покрытиях сложной многофазной нанокристаллической и/или аморфной структуры обеспечивает такие уникальные свойства, как сверх- и ультратвердость (40–100 ГПа), низкий коэффициент трения ( $\leq 0,1$ ), высокую степень упругого возврата (80–94 %), упругую деформацию более 10%, высокую прочность на разрыв 10–40 ГПа, высокую термическую стабильность (до 1700 °С), стойкость к окислению при высоких температурах ( $>1000$  °С) [3].

Согласно Т.Е. Tallian [3] и другим [4], основными причинами преждевременных отказов подшипников качения являются механизмы износа, а не усталость. В попытке решить наиболее значительные проблемы износа, с которыми сталкиваются подшипники качения, работающие в режиме смазывания пограничного слоя, иногда используются гибридные подшипники, в которых используются керамические шарики и стальные дорожки качения. Тем не менее, гибридные подшипники используются главным образом в критических областях применения из-за их высокой стоимости [5]. Для улучшения трибологических характеристик шариковых подшипников было разработано несколько типов покрытий. Наиболее широко изученными трибологическими покрытиями для применения в стальных шарикоподшипниках являются легированные металлом алмазоподобные углероды (DLC) и нитриды, которые обладают высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью.

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. Для получения постоянной толщины покрытия необходимо придать сферической подложке равномерное вращение при нанесении покрытий. Для решения этого вопроса бы-

ла поставлена задача получения износостойких композиционных покрытий на поверхности подшипника качения из стали ШХ15 методом механохимического сплавления (МС). Идея применения метода МС для получения покрытий берет свое начало от отрицательного явления налипания порошка на поверхности шаров и рабочей камеры. В 1993 году впервые было акцентировано внимание на образование Ti-Al-ZrO<sub>2</sub> покрытий толщиной 8 мкм на поверхности стальных шаров в процессе механического сплавления [6]. В 2002 году была опубликована работа, где рассматривает механохимический метод в качестве нового способа нанесения покрытий [7]. Сущность данного метода: металлические или керамические шары и металлический или керамический порошок заданного химического состава помещаются внутрь камеры, которая приводится в вибрационное движение. Вибрация камеры передает энергию шарам, которые начинают хаотично летать и соударяться друг с другом. Под воздействием ударов частицы порошка холодно-диффузионно свариваются с поверхностью шара. Частицы подвергаются механическому измельчению и многократно повторяющемуся деформированию и уплотнению на поверхности, образуя покрытие. В связи с вышеизложенным, в данной работе был предложен способ получения износостойких покрытий на поверхности «тела качения» подшипника качения методом МС.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методом механохимического синтеза на поверхности шариков подшипника из стали ШХ15 было получено тонкое покрытие из Cr<sub>2</sub>N на вибрационном стенде СВУ2. Оптимальными параметрами для нанесения покрытий были выбраны: амплитуда колебания 3,5 мм; частота колебания 50 Гц; степень заполнения камеры 50%, диаметр шара 6 мм; отношение массы порошка к массе шаров  $m_n:m_{ш}=1:30$ , время обработки методом механохимического синтеза 1 ч. Толщина покрытий на поверхности шарика оценивалась методом калотест. Методика заключается в шлифовании шариком образца с покрытием, толщина покрытия измеряется в соответствии с геометрией следа от шарика на образце и шлифовального шарика. Оптический анализ проекции на плоскость получившейся сферообразной выемки на покрытие и матрице позволяет определить толщину покрытия. При измерении диаметра переходной зоны покрытия и матрицы, толщина покрытия может быть определена при помощи простых геометрических вычислений. В целях определения толщины покрытий шлифовальным шариком служил шарик с покрытием Cr<sub>2</sub>N. На рисунке 1 показан сферический шлиф поверхности шарика, на основе которого можно примерно оценить толщину покрытий до 2 мкм.

Трибологические характеристики покрытий изучались с помощью машины трения по схеме шар-диск. На первом этапе трибологических испытаний были проведены эксперименты по изучению харак-

тера износа контртела (шар диаметром 3 мм) из стали ШХ15 без покрытия и с покрытием Cr<sub>2</sub>N. Эксперименты проводились при комнатной температуре 25 °С, длине пробега 300 м и при нагрузке 5 Н. Контртела из стали ШХ15 без покрытия сильно изнашивается в ходе испытаний, в процессе трения на шарике образуется площадка износа, что приводит к увеличению площади контакта (рисунок 2а). Также стоит отметить, что глубина канавки износа циклично изменяется в пределах одной дорожки (фрагмент рисунка 2а), что свидетельствует о возникновении сдвиговых напряжений, что, в свою очередь, является результатом схватывания при трении. Контртела с покрытием имеют склонность к абразивному износу. В процессе трения, выкрошенные из шарика частицы, являются абразивом, что приводит к увеличению глубины дорожки износа (рисунок 2б).

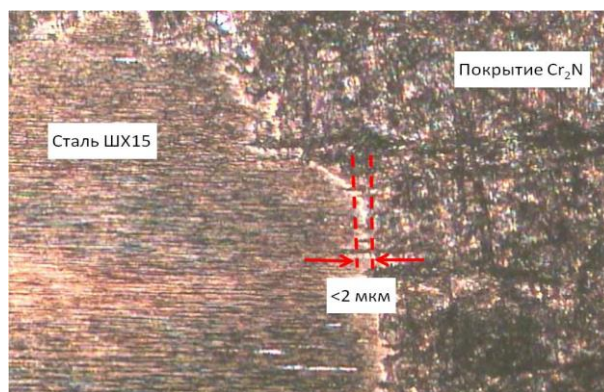


Рисунок 1. Сферический шлиф покрытия Cr<sub>2</sub>N на поверхности подшипникового шарика из стали ШХ15

Трибологические характеристики покрытия были оценены с помощью трибологических испытаний, проводимых на плоской поверхности. На поверхность диска толщиной 2 мм методом механохимического синтеза было нанесено Cr<sub>2</sub>N покрытие. На сегодняшний день нет отработанной методики определения трибологических характеристик покрытий на шариках. Несмотря на то, что покрытия на поверхности стальных шарикоподшипниках широко используется, было опубликовано лишь несколько работ, касающихся нанесения покрытий на сферические элементы качения и определения характеристик покрытий по их трибологическим характеристикам при контакте качения [8]. Для нанесения покрытий были выбраны следующие параметры: амплитуда колебания 3,5 мм; частота колебания 50 Гц; диаметр шара 6 мм; отношение массы порошка к массе шаров  $m_n:m_{ш}=1:30$ , время обработки методом механохимического синтеза 1 ч. Степень заполнения камеры 80–85%, Она подбиралась с учетом того, что расстояние между поверхностью шарового слоя и обрабатываемого материала было близко к значению размаха колебаний (две амплитуды) для получения максимальной силы удара шаров.

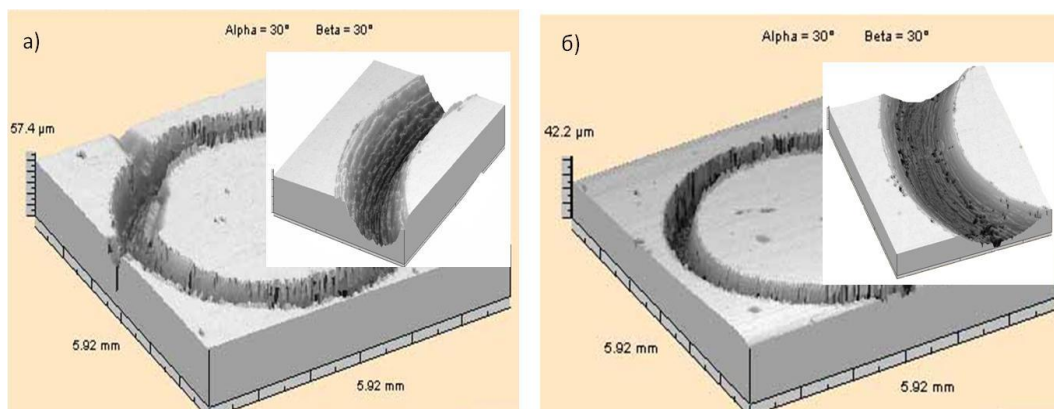


Рисунок 2. Площадь контакта стали ШХ15 с контртелом: без покрытия (а) и с покрытием Cr<sub>2</sub>N (б)

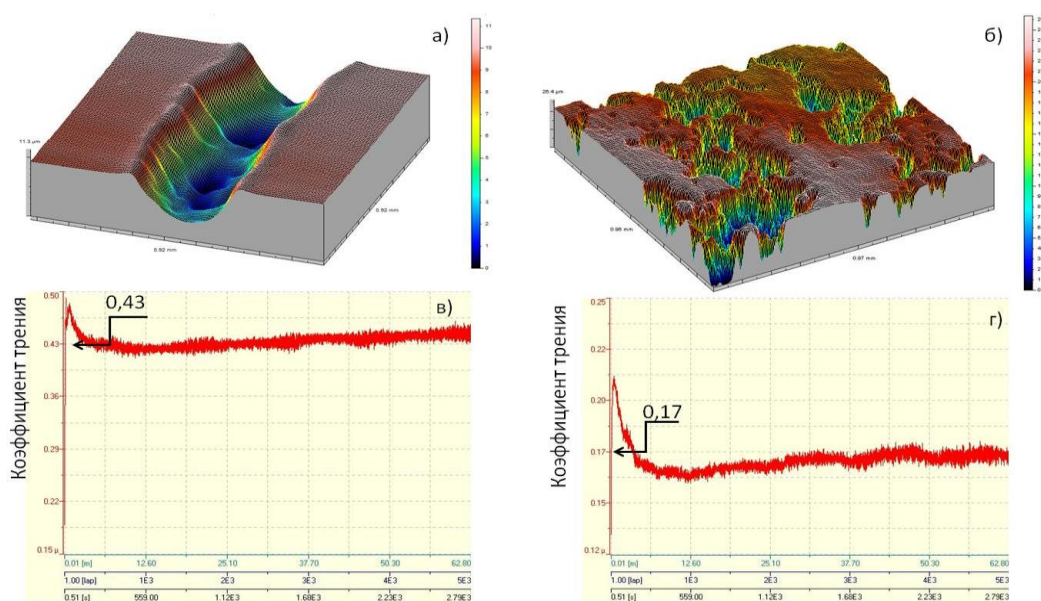


Рисунок 3. Фрагменты дорожки износа и коэффициент трения до (а, в) и после нанесения покрытий Cr<sub>2</sub>N (б, г) на поверхности стали ШХ15

На рисунке 3 представлены результаты трибологических испытаний методом «шар-диск» стали ШХ15 до и после нанесения Cr<sub>2</sub>N покрытий. В качестве контртела применялся шарик из ШХ15 (без покрытия) диаметром 3 мм. Параметры исследований были одинаковы для всех исследуемых образцов: нагрузка 5 Н, скорость 2 см/с, комнатная температура.

Анализ поперечных сечений дорожек износа после испытаний свидетельствует о том, что после нанесения покрытий износ фактически отсутствует (рисунок 3б). Образец с покрытием обладает коэффициентом трения 0,14–0,17. Отметим, что для того, чтобы считать конкретный материал перспективным для его применения в сухих парах трения, материал должен обладать низким коэффициентом трения (<0,2).

С целью повышения срока службы и надежности подшипников газотурбинных двигателей путем повышения их коррозионной стойкости разрабатываются различные методы увеличения срока службы подшипников в ситуациях, когда может возникнуть

загрязнение смазочного масла соленой водой. Если в подшипник проникает вода или агрессивные среды в таком объеме, что смазочные материалы не могут защищать стальные поверхности, то возникает коррозия. В работе [9] было исследовано влияние нагрева на коррозионные свойства сталей, покрытых TiN и CrN. Результаты исследования показали, что образцы с покрытием из CrN показали лучшие антикоррозионные свойства, чем стали с покрытием из TiN. Методом потенциометрии была определена коррозия стали ШХ15 до и после нанесения тонкопленочного покрытия Cr<sub>2</sub>N методом МС. Методика испытаний, потенциометрия, основана на зависимости концентрации/активности ионов в растворе с электродом от равновесного электродного потенциала, т.е. измерялась ЭДС обратимого гальванического элемента, состоящего из электродов, погруженных в исследуемый раствор, где потенциал зависел от концентрации определяемых ионов. Коррозионные испытания проводили на потенциостате-гальваностате Р150, в 4%

растворе азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ). Оценка коррозионного поведения образцов проводилась по величине их электродных потенциалов, путем измерения и регулирования токов и напряжений на рабочем электроде в процессе электрохимических исследований. Результаты испытания показали, что после нанесения покрытия  $\text{Cr}_2\text{N}$  скорость коррозии составляла 0,191 см/год, т.е. в два раза меньше по сравнению со сталью ШХ15 без покрытия.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были исследованы трибологические и коррозионные характеристики тонкопленочных покрытий на основе хрома, нанесенных методом МС. Метод МС

позволяет получать  $\text{Cr}_2\text{N}$  покрытия на поверхности тел качения подшипника. Выявлено улучшение трибологических и коррозионных характеристик стали ШХ15 после нанесения тонкопленочных покрытий на основе  $\text{Cr}_2\text{N}$ . В дальнейших исследованиях будет изучено влияние МС покрытий на основе нитрида хрома на геометрические характеристики (погрешность формы, шероховатость, волнистость сферических подложек) поверхности тел качения подшипников.

*В статье использованы результаты, полученные при поддержке программы целевого финансирования МОН РК, грант BR052236748.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Котов С.Ю., Беляев Г.Я. Влияние вакуумно-плазменного упрочнения элементов качения на долговечность подшипника // Наука и техника – 2014. – № 2. – С. 57–61.
2. Veprek S., Reiprich S. A concept for the design of novel superhard coatings // Thin Solid Films. – 1995. – V. 268. – P. 64–71.
3. Tallian T.E. On competing failure modes in rolling contact, ASLE Trans. 10 (1967) P. 418–439.
4. Kato K., Adachi K. Wear mechanisms, in: B. Bhushan (Ed.), Mod. Tribol. Handb. Princ. Tribol, CRC Press Inc. 2001. – P. 273–300.
5. Savan A., Boving H.J., Fluehmann F., Hintermann H.E. Increased performance of bearings using TiC-coated balls, J. Phys. IV 03, 1993. – С. 943–948.
6. Kobayashi K., Miwa K., Takayanagi T., Ohnaka I., Formation of Ti-Al-ZrO<sub>2</sub> Film on the Surface of Mechanical Alloying Ball // Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. – 1993. – V.40(10). – P.955–958.
7. Torosyan A.R., Tuck J.R., Korsunsky A.M., Barseghyan S.A., A New Mechanochemical Method for Metal Coating // Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials. – 2002. – V.13. – P. 251–256.
8. Kalyan C., Mutyala H., Singh, R.D., Evans C., Doll G.L. Deposition, characterization, and performance of tribological coatings on spherical rolling elements // Surface & Coatings Technology. – 2015. – V. 284. – P. 302–309.
9. Ürgen M., Çakir A.F., The effect of heating on corrosion behavior of TiN- and CrN-coated steels, Surface and Coatings Technology Volume 96, Issues 2–3, 25 November 1997, P. 236–244.

### ХРОМНИТРИД НЕГІЗІДІ ЖАБЫН ЖАҒУ АРҚЫЛЫ МОЙЫНТІРЕКТІҢ ТОЗУҒА ТӨЗІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

<sup>1)</sup> Ж.Б. Сағдолдина, <sup>1)</sup> Г.Б. Ботабаева, <sup>2)</sup> О.А. Степанова <sup>1)</sup> Е. Жанимхан

<sup>1)</sup> С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік университеті, Өскемен, Қазақстан

<sup>2)</sup> Семей қаласының Шәкәрім атындағы мемлекеттік университеті, Семей, Қазақстан

Осы мақалада  $\text{Cr}_2\text{N}$  жамылғысының мойынтіректің қолданыстағы сипаттамаларына әсерін анықтау мақсатында механикалық балғамен әдісімен алынған жұқа қабыршақты жабындардың трибологиялық және коррозиялық сипаттамалары зерттелді. Жабындардың «шар-диск» схемасы бойынша  $\text{Cr}_2\text{N}$  жабынын жаққанға дейін және одан кейінгі трибологиялық сипаттамалары зерттелді. Контртел ретінде ШХ15 (жабыны жоқ) шар қолданылды. Сынауодан кейін тозу жолақтарының көлденең қималарын талдау жабындар жағылғаннан кейін тозу мүлдем жоқ екенін көрсетті. Жабыны бар үлгінің үйкеліс коэффициенті 0,14–0,17 болады, яғни құрғақ үйкеліс жұбындағы материалдарға ұсынылатын үйкеліс коэффициентінің (<0,2) мәнінен аспайды. Потенциометрия әдісімен  $\text{Cr}_2\text{N}$  жұқа қабыршақты жабынды жаққанға дейін және одан кейін ШХ15 болатының коррозиясы анықталды. Коррозиялық сынаулар Р150 потенциостат-гальваностатында, азот қышқылының 4% ерітіндісінде ( $\text{HNO}_3$ ) жүргізілді. Сынақ нәтижелері  $\text{Cr}_2\text{N}$  жабынын жаққаннан кейін коррозия жылдамдығы 0,191 см/жыл құрағанын көрсетті, яғни жабыны жоқ ШХ15 болатымен салыстырғанда екі есе аз.

**INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF ROLLING BEARINGS  
BY APPLYING A CHROMIUM NITRIDE COATING**

<sup>1)</sup> Zh.B. Sagdoldina, <sup>1)</sup> G.B. Botabaeva, <sup>2)</sup> O.A. Stepanova, <sup>1)</sup> E. Zhanimkhan

<sup>1)</sup> *Sarsen Amanzholov East Kazakhstan State University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *Shakarim State University of Semey, Semey, Kazakhstan*

To determine the effect of Cr<sub>2</sub>N coating on the performance of rolling bearings, this article has studied the tribological and corrosion characteristics of thin-film coatings obtained by the MF method. The tribological characteristics of coatings were studied using the “ball on disk” scheme before and after Cr<sub>2</sub>N coatings were applied. As the counterbody was used a ball of SchCh15 (without coating). Analysis of cross-sections of wear tracks after testing indicates that there is virtually no wear after coating. The coated sample has a coefficient of friction of 0.14–0.17, i.e. it does not exceed the value of the coefficient of friction (<0.2) required for materials in dry friction pairs. The method of potentiometry was used to determine the corrosion of steel SchCh15 before and after applying a thin-film coating Cr<sub>2</sub>N. Corrosion tests were performed on a potentiostat-galvanostat P150, in a 4% solution of nitric acid (HNO<sub>3</sub>). The test results showed that after applying the Cr<sub>2</sub>N coating, the corrosion rate was 0.191 cm/year, i.e. half as much as that of uncoated steel SchCh15.