

РАЗРУШЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ НИТРИДА ЦИРКОНИЯ, ФОРМИРУЕМЫХ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАГРУЗОК

С. Ю. КОТОВ¹⁾, И. С. ФРОЛОВ¹⁾

¹⁾Белорусская государственная академия связи, ул. Ф. Скорины, 8/2, 220076, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Рассмотрены трещиностойкие свойства покрытий, формируемых методом реактивного магнетронного распыления на основах из подшипниковой стали. Представлены особенности разрушения покрытий из нитрида циркония толщиной 0,3–0,7 мкм, нанесенных на плоские основы из конструкционной подшипниковой стали марки ШХ15 (ГОСТ 801-78), в условиях одноосного растяжения. Отмечено, что при действии растягивающих нагрузок, приводящих к относительному удлинению образцов на 0,1–20,0 %, на поверхности покрытий из нитрида циркония толщиной до 0,7 мкм не обнаружено признаков отслоения либо скалывания. Возникновение первых трещин, направленных перпендикулярно действию растягивающей нагрузки, в покрытии толщиной 0,7 мкм выявлено при относительном удлинении образца 0,5 %, а в покрытии толщиной 0,3 мкм – при относительном удлинении образца 3,0 %. Приведены результаты дифрактометрических исследований структурных особенностей покрытия из нитрида циркония, получаемого методом реактивного магнетронного распыления, и величины остаточных напряжений в этом покрытии. Установлено, что покрытия из нитрида циркония толщиной 0,3–0,7 мкм, формируемые методом реактивного магнетронного распыления на основах из конструкционной подшипниковой стали марки ШХ15, имеют высокие трещиностойкие свойства в условиях одноосного растяжения, это доказывает целесообразность их применения в узлах трения качения.

Ключевые слова: подшипник качения; метод реактивного магнетронного распыления; вакуумно-плазменное функциональное покрытие; образование трещин в тонких пленках.

Благодарность. Авторы выражают признательность кандидату физико-математических наук Н. М. Чекану за ценные советы при обсуждении результатов исследования.

Образец цитирования:

Котов СЮ, Фролов ИС. Разрушение покрытий из нитрида циркония, формируемых методом реактивного магнетронного распыления, под действием растягивающих нагрузок. Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2025;3:40–47.
EDN: GVJXIL

For citation:

Kotov SYu, Frolov IS. Destruction of zirconium nitride coatings formed by reactive magnetron sputtering under tensile loads. Journal of the Belarusian State University. Physics. 2025;3:40–47. Russian.
EDN: GVJXIL

Авторы:

Сергей Юрьевич Котов – старший преподаватель кафедры организации и технологии почтовой связи факультета инжиниринга и технологий связи.

Игорь Станиславович Фролов – кандидат технических наук; доцент кафедры организации и технологии почтовой связи факультета инжиниринга и технологий связи.

Authors:

Sergey Yu. Kotov, senior lecturer at the department of postal communication organisation and technology, faculty of engineering and communication technologies.

kotov_sergey09@mail.ru

Igor S. Frolov, PhD (engineering); associate professor at the department of postal communication organisation and technology, faculty of engineering and communication technologies.

frolov64@rambler.ru

DESTRUCTION OF ZIRCONIUM NITRIDE COATINGS FORMED BY REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING UNDER TENSILE LOADS

S. Yu. KOTOV^a, I. S. FROLOV^a

^aBelarusian State Academy of Communications, 8/2 F. Skaryny Street, Minsk 220076, Belarus

Corresponding author: S. Yu. Kotov (kotov_sergey09@mail.ru)

Abstract. The crack-resistant properties of coatings formed by reactive magnetron sputtering on bearing steel bases are considered. The features of destruction of zirconium nitride coatings with thicknesses of 0.3–0.7 μm on flat bases made of structural bearing steel grade ShKh15 (GOST 801-78) under uniaxial tension conditions are presented. It has been shown that, under tensile loads leading to a relative elongation of samples by 0.1–20.0 %, no signs of peeling or chipping were detected on the surface of zirconium nitride coatings with thicknesses of up to 0.7 μm . The occurrence of the first cracks directed perpendicular to the tensile load were detected in a coating with a thickness of 0.7 μm was established at a relative elongation of the sample of 0.5 %, while in a coating with a thickness of 0.3 μm , the formation of cracks begins at a relative elongation of the sample of 3.0 %. The results of diffractometric studies of the structural features and magnitude of residual stresses of a zirconium nitride coating formed by reactive magnetron sputtering are presented. It has been established that the zirconium nitride coatings with a thickness of 0.3–0.7 μm formed by reactive magnetron sputtering on flat bases made of structural bearing steel grade ShKh15 under uniaxial tension conditions has high crack-resistant properties, which proves the feasibility of their use in rolling friction units.

Keywords: rolling bearing; reactive magnetron sputtering; vacuum-plasma functional coating; crack formation in thin films.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to PhD (physics and mathematics) N. M. Chekan for valuable advice when discussing the research results.

Введение

При современном уровне развития машиностроения одной из основных проблем является обеспечение высоких эксплуатационных характеристик машин и приборов. Значительная часть отказов промышленной, горнодобывающей, сельскохозяйственной и транспортной техники происходят в результате выхода из строя подшипников качения. Недостаточные эффективность, надежность и долговечность подшипников качения ведут к простоям техники, потерям сырья и, как следствие, снижению экономической эффективности хозяйственной деятельности, существенному повышению стоимости эксплуатации оборудования и снижению конкурентоспособности производимой продукции.

Учитывая постоянно растущие требования предприятий страны к эксплуатационным характеристикам подшипников качения (их надежности, быстроходности, величине энергетических потерь), а также необходимость обеспечения технологической безопасности государства, уменьшения зависимости от импортной продукции, разработка технологий повышения качества подшипников является актуальной задачей для различных отраслей народного хозяйства, решение которой позволит увеличить надежность и безопасность техники и тем самым снизить расходы, связанные с ее обслуживанием и ремонтом.

В отечественной и мировой практике для повышения надежности и долговечности узлов трения качения используются разнообразные методы, такие как применение новейших конструкционных и смазочных материалов, модернизация и оптимизация конструкции подшипников, совершенствование технологии производства и монтажа узлов трения и т. д. Одним из методов увеличения срока службы шариковых подшипников могло бы стать нанесение на поверхность тел качения покрытий с заданными параметрами (толщиной, химическим составом, остаточными напряжениями, микротвердостью и др.) [1]. Однако ряд неизученных вопросов мешают широкому внедрению покрытий в промышленное производство. Так, одной из главных проблем упрочнения деталей узлов трения качения являются высокие контактные напряжения, возникающие в процессе их эксплуатации ввиду значительных сил нагружения, а также малых площадей контакта тел качения и шариковых подшипников¹ [2], что ставит под сомнение целесообразность формирования функциональных покрытий на деталях шариковых подшипников.

¹Черменский О. Н., Федотов Н. Н. Подшипники качения : справочник-каталог. М. : Машиностроение, 2003. 576 с.

Материалы и методы исследования

Заключение о целесообразности формирования функциональных покрытий на деталях шариковых подшипников основывалось на сопоставлении результатов компьютерного моделирования для выбранного объекта исследования и результатов практических испытаний образцов покрытия на разрывной испытательной машине.

Объект исследования. В качестве объекта исследования выступали тела качения шариковых подшипников. Из широкой номенклатуры моделей подшипников качения был выбран однорядный радиальный шариковый подшипник 305A (ГОСТ 8338-75; международная маркировка – ISO 6306), основные технические характеристики которого приведены в таблице.

Основные технические характеристики однорядного радиального шарикового подшипника 305A

Main technical characteristics of single row radial ball bearing 305A

Характеристика	Значение
Внутренний диаметр, мм	25
Наружный диаметр, мм	62
Ширина, мм	17
Динамическая грузоподъемность, Н	22 500
Статическая грузоподъемность, Н	11 400
Предельная частота вращения (пластичный смазочный материал), мин ⁻¹	11 000
Предельная частота вращения (жидкий смазочный материал), мин ⁻¹	14 000
Масса, кг	0,23

Однорядный радиальный шариковый подшипник 305A широко применяется в таких отраслях промышленности, как машиностроение, электроэнергетика, черная и цветная металлургия и др. Данный подшипник эксплуатируется в условиях, типичных для большинства подшипников качения, поэтому его наружное и внутреннее кольца, а также тела качения изготавливаются из конструкционной подшипниковой стали марки ШХ15 (ГОСТ 801-78).

Методика формирования покрытий. Учитывая преимущества метода реактивного магнетронного распыления (полное отсутствие капельной фазы, высокая производительность и т. д.), при исследовании трибологических и физических характеристик покрытий, а также при проведении эксплуатационных и стендовых сравнительных испытаний предпочтение отдавалось именно этому методу нанесения покрытий. Формирование вакуумно-плазменных покрытий осуществлялось на магнетронной установке Unicoat-900 (НПФ «Элан-практик», Россия) с несбалансированными магнетронами.

Критерием выбора химического состава покрытий для проведения исследований было обеспечение минимальных остаточных напряжений, высоких адгезионных свойств по отношению к подшипниковой стали, а также отсутствие выраженных недостатков (высокая себестоимость оборудования и расходных материалов, сложность технологического процесса формирования покрытий, выраженные абразивные характеристики и т. д.). Наиболее полно предъявляемым требованиям согласно проведенным ранее исследованиям [3; 4] соответствовало покрытие из нитрида циркония (ZrN).

Подготовка поверхности основ перед непосредственным формированием покрытия включала следующие операции: обезжиривание, предварительную очистку, импульсное электролитно-плазменное полирование и окончательную очистку. Обезжиривание тел качения осуществлялось бензином «Калоша» (ГОСТ 443-76) в ультразвуковой ванне УЗМ-1.8 (ООО «Квинтал», Украина) при частоте 40 кГц в течение 10 мин. Предварительная очистка поверхности основ выполнялась водой при температуре 50–60 °С, а окончательная очистка – дистиллированной водой при температуре (22 ± 2) °С в ультразвуковой ванне на протяжении 10 мин. Импульсное электролитно-плазменное полирование образцов проводилось в 6 % водном растворе сульфата аммония при температуре раствора 75–80 °С и напряжении обработки (300 ± 5) В. В процессе обработки образцы располагались одним слоем в подвесной решетчатой корзине К-001 (ООО «Квинтал») из нержавеющей стали.

В качестве плазмообразующего газа использовался аргон с постоянной скоростью потока 40 мл/мин. Для формирования покрытия в вакуумную камеру напускался азот повышенной степени очистки марки 6.0 (ТУ 20.11.11-009-45905715-2017) в количестве 25–30 % от объема аргона. Расстояние от мишени до основы составляло $(40,0 \pm 0,5)$ см, потенциал смещения был равен 50 В. Остаточное давление в вакуумной камере составляло 0,1–0,2 Па. Величина магнитного поля постоянного магнита была равна 0,03 Тл. Температура основ при формировании покрытий составляла 160–170 °С, она контролировалась бесконтактным методом при помощи тепловизора ТКТИ21 (SKF, Швеция) с погрешностью $\pm 2,5$ °С в диапазоне измеряемых температур. Для повышения адгезионной прочности покрытия формировались с промежуточным переходным слоем из металла электрода толщиной 0,05–0,07 мкм. Режим нанесения покрытия ZrN был следующим: напряжение на катоде 630 В; напряжение на аноде 50 В; сила тока на катоде при травлении 16 А.

Толщина наносимых покрытий контролировалась на образцах-свидетелях методом калотестирования на приборе CAT-S-AE-0000 (CSM Instruments, Швейцария). Сущность методики калотестирования заключается в том, что вращающийся индентор сферической формы, покрытый абразивной суспензией, прижимается к поверхности покрытия. В результате образуются следы изнашивания покрытия и основы в виде сферического кратера. Оптический анализ горизонтальной проекции сфероидальной лунки на поверхности образца позволяет определить толщину покрытия в автоматическом режиме.

Изучение и фотографирование поверхности образцов с покрытиями выполнялись с использованием комплекса микро- и макроанализа на базе микроскопа МКИ-2М-1 (ОАО «Планар», Беларусь).

Дифрактометрические исследования проводились на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4-07 (НПП «Буревестник», Россия) с программным управлением и сканирующим угловым устройством ГУР-9. Изучение образцов осуществлялось с использованием CuK_α -излучения, селективного поглощающего никелевого фильтра и сцинтилляционного детектора отраженных лучей. В ходе анализа дифрактограммы определялись интегральная интенсивность, угловое положение и полуширина дифракционных максимумов. Обработка дифрактограммы перед проведением анализа заключалась в удалении фона, сглаживании, выделении $K_{\alpha 1}$ -дублета и аппроксимировании дифракционных пиков посредством функции псевдо-Фойгта.

При условии изотропии упругих констант материала покрытия связь между компонентами тензора деформации (ε_{ik}) и тензора напряжений (σ_{ik}) определяется исходя из общего уравнения деформации изотропной среды²:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1-\nu}{E} \left(\sigma_{ik} - \frac{\nu}{1+\nu} \sum_l \sigma_{ll} \delta_{ik} \right), \quad (1)$$

где E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; δ_{ik} – символ Кронекера ($\delta_{ik} = 0$ при $i \neq k$ и $\delta_{ik} = 1$ при $i = k$).

В тонких пленках сжимающие и растягивающие остаточные напряжения первого рода являются двухосными, а сдвиговые напряжения отсутствуют. Если исходить из условия, что оси x и y расположены в плоскости пленки, то нормаль к ней совпадает с осью z . В такой системе координат отличными от нуля являются только две компоненты тензора напряжений (σ_{xx} и σ_{yy}) и три компоненты тензора деформации (ε_{xx} , ε_{yy} и ε_{zz}). Для изотропной среды $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ и $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$. В этом случае выражение (1) упрощается следующим образом:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1-\nu}{E} \sigma_{xx}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{2\nu}{E} \sigma_{xx}. \quad (3)$$

Как следует из формул (2) и (3), при известных значениях упругих констант для тонких пленок ZrN напряжения определяются исходя из деформации покрытий в каком-либо направлении. Если параметры недеформированной кристаллической решетки заранее неизвестны, то для расчета деформации используется так называемый метод $\sin^2 \psi$ (синус-квадрат пси), где ψ есть угол наклона плоскости пленки к плоскости падения и отражения рентгеновских лучей. При получении дифракционной картины по методу Брэгга – Брентано угол ψ определяет, насколько отражающие плоскости выбранного для

²Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости : учеб. пособие. 4-е изд., испр. и доп. М. : Наука, 1987. 248 с. (Теоретическая физика : в 10 т. ; т. 7).

анализа напряжений рефлекса повернуты от плоскостей с индексами Миллера (hkl) относительно оси z , т. е. нормали к плоскости подложки. Чем больше угол поворота, тем выше степень деформации и тем меньше межплоскостные расстояния, достигающие своего минимума при $\psi = 90^\circ$. Математическое выражение, описывающее эту зависимость, имеет следующий вид [5]:

$$d = \frac{1+\nu}{E} d_0 \sigma_{xx} \sin^2 \psi + d_0 - \frac{2\nu}{E} d_0 \sigma_{xx}, \quad (4)$$

где d_0 и d – межплоскостное расстояние для плоскостей (hkl) недеформированной и деформированной кристаллической решетки соответственно.

Из выражения (4) следует, что имеет место линейная зависимость межплоскостных расстояний от $\sin^2 \psi$. В настоящей работе для анализа деформаций выбраны плоскости (311), отражение от которых сохраняется при наклоне подложки, что свидетельствует об отсутствии осевой текстуры.

С учетом известного выражения Брэгга – Вульфа для дифракции данные удовлетворительно аппроксимируются наклонной прямой:

$$d = k \sin^2 \psi + b,$$

где k – коэффициент пропорциональности; b – свободный член уравнения.

В окончательном виде формула для расчета напряжений по методу $\sin^2 \psi$ записывается следующим образом:

$$\sigma_{xx} = E \frac{k}{b + b\nu + 2k\nu},$$

где модуль Юнга E принимается равным 380–420 ГПа, а коэффициент Пуассона ν принимается равным 0,24 [6].

Методика исследования покрытий на разрушение. Исследование покрытия на образование трещин, отслоение и скалывание проводилось на разрывной испытательной машине ProLine (ZwickRoell, Германия), соответствующей требованиям ГОСТ 28840-90, с автоматической фиксацией величины растягивающего усилия и изменения размеров образцов. При проведении исследования использовались плоские образцы с головками (тип I по ГОСТ 1497-84), имеющие длину ($125,0 \pm 0,3$) мм, ширину в рабочей части ($10,00 \pm 0,05$) мм и толщину ($3,00 \pm 0,03$) мм и изготовленные из стали марки ШХ15 (ГОСТ 801-78) методом лазерной резки. Перед нанесением покрытия поверхность образцов подвергалась шлифованию до $Ra = 0,50$ – $0,64$ мкм. В эксперименте принимали участие образцы с покрытиями ZrN толщиной 0,3; 0,5 и 0,7 мкм. Диапазон величин относительного удлинения образцов при растяжении (0,1; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 10,0; 15,0 и 20,0 %) выбирался таким образом, чтобы исключить образование трещин в материале основы. Скорость нагружения при растяжении была постоянной и составляла 3 мм/мин. После достижения заданной величины растяжения образцы выдерживались под действием растягивающей нагрузки на протяжении 5 с.

Результаты и их обсуждение

Результаты дифрактометрического исследования покрытия ZrN, сформированного методом реактивного магнетронного распыления на плоской основе из стали марки ШХ15, представлены на рис. 1.

Наличие рефлексов (111), (200), (311), (511) и их угловое расположение свидетельствуют о формировании тонкоплочного материала с гранецентрированной кубической решеткой, структура которого соответствует фазе В1 для бинарных соединений (структура типа NaCl). Преобладание пика рефлекса (311) на фоне рефлексов (111) и (200) указывает на осевую структурированность покрытия. Значения интенсивностей дифракционных максимумов существенно отличаются от характерного для порошков распределения интенсивностей.

Для расчета напряжений покрытия был выбран рефлекс (311), что связано с его лучшей идентификацией. Рефлекс (311), расположенный в области угла $2\theta = 67,38^\circ$, четко выражен. После идентификации рефлекса производилась асимметричная съемка, при этом угол ψ принимался равным 0° , 10° , 20° и 30° . После установления положения рефлексов полученные точки были представлены в виде зависимости с линейной аппроксимирующей функцией (рис. 2).

Таким образом, при установленном режиме нанесения покрытия ZrN методом реактивного магнетронного распыления формируется покрытие с умеренными значениями двухосных сжимающих остаточных напряжений (на уровне 720–800 МПа).

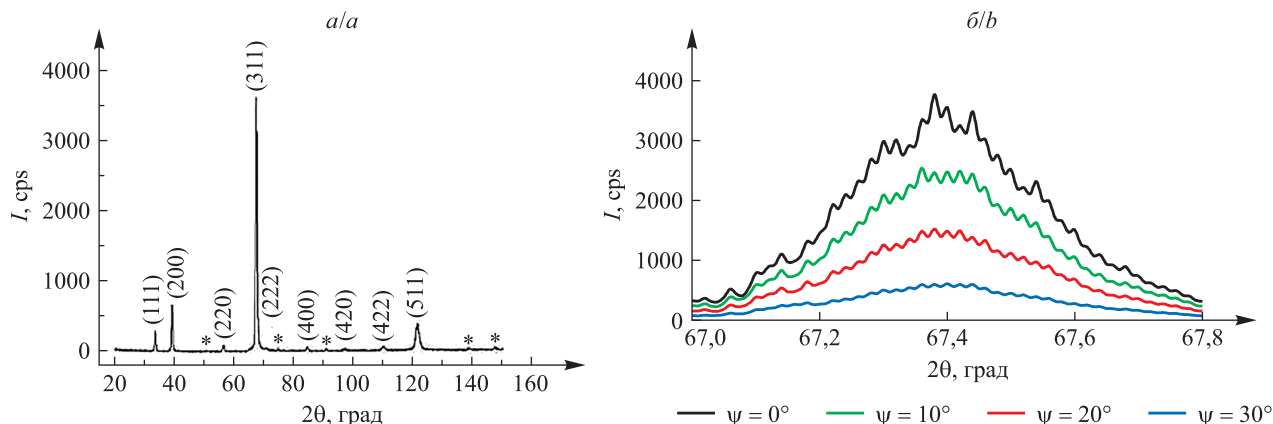


Рис. 1. Результаты дифрактометрического исследования вакуумно-плазменного покрытия ZrN на плоской основе из стали марки ШХ15:
а – дифрактограмма вакуумно-плазменного покрытия ZrN (знаком * отмечены пики фазы γ -Fe, пики основы зачищены);
б – асимметричная съемка в диапазоне угла 2θ для рефлекса (311)

Fig. 1. Results of a diffractometric study of a ZrN vacuum-plasma coating on a flat base made of steel grade ShKh15: а – diffraction pattern of a ZrN vacuum-plasma coating (the sign * indicates the peaks of the phase γ -Fe, the peaks of the base are stripped);
b – asymmetrical shooting in the range of angle 2θ for reflection (311)

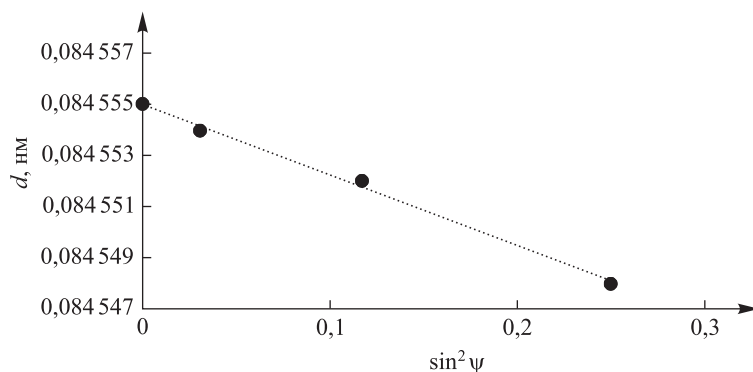


Рис. 2. Линейная зависимость положения дифракционного максимума (311) от $\sin^2\psi$ с линейной аппроксимацией

Fig. 2. Linear dependence of the position of the diffraction maximum (311) on $\sin^2\psi$ with linear approximation

Графики зависимости плотности (n) поперечных трещин в покрытии ZrN различной толщины (h) от величины относительного удлинения образца (Δl) при растяжении представлены на рис. 3. Фотографии трещин приведены на рис. 4.

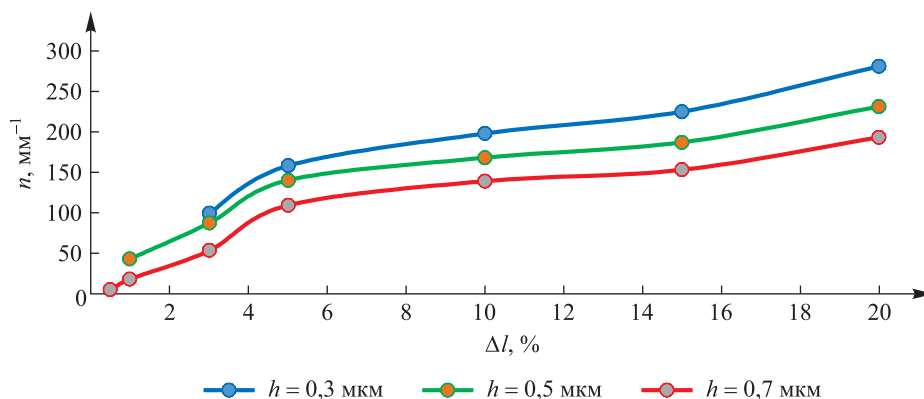


Рис. 3. Зависимость плотности поперечных трещин в покрытии ZrN различной толщины от величины относительного удлинения образца при растяжении

Fig. 3. Dependence of transverse crack density in a ZrN coating of various thicknesses on the relative elongation of the sample under tension

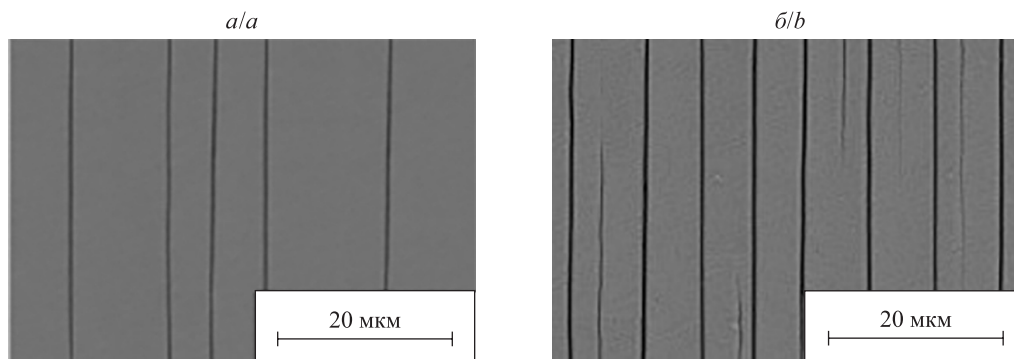


Рис. 4. Фотографии трещин на поверхности покрытия ZrN толщиной 0,7 мкм после растяжения:
a – относительное удлинение образца 3,0 %; *б* – относительное удлинение образца 10,0 %

Fig. 4. Photographs of cracks on the surface of the ZrN coating 0.7 μm thick after stretching:
a – relative elongation of the sample 3.0 %; *b* – relative elongation of the sample 10.0 %

При продольном растяжении образцов до относительного удлинения 0,1 % на поверхности покрытий толщиной 0,3–0,7 мкм образования трещин не выявлено. Возникновение первых трещин, направленных перпендикулярно действию растягивающей нагрузки, в покрытии толщиной 0,7 мкм обнаружено при относительном удлинении образца 0,5 %, а в покрытии толщиной 0,3 мкм – при относительном удлинении образца 3,0 %.

Подсчет количества трещин на единицу длины образца показал, что в покрытиях меньшей толщины плотность поперечных трещин превышает их плотность в покрытиях большей толщины. Выявленные особенности образования трещин позволяют рассматривать разрушение покрытия при растяжении как механизм адаптации (релаксации). Так, под действием одноосной растягивающей нагрузки возникает деформация основы, передающаяся покрытию, а после достижения некоторой степени деформации вследствие перераспределения атомного объема увеличивается расстояние между поверхностными атомными слоями, в результате чего в покрытии образуются множественные локальные повреждения (микротрещины), ориентированные перпендикулярно растягивающему напряжению. При дальнейшем растяжении наблюдаются развитие щелевых микродефектов вглубь покрытия и их объединение в магистральную трещину, которая обеспечивает локальную диссипацию энергии упругой деформации, накопленной в процессе растяжения. Релаксирующие способности покрытия в таком случае будут находиться в прямой зависимости от геометрических параметров щелевого дефекта. В областях, удаленных от магистральной трещины, напряжения растяжения остаются высокими, что создает предпосылки для возникновения других трещин, параллельных между собой. Таким образом, в покрытиях меньшей толщины адаптация к возникающим растягивающим напряжениям по причине меньших геометрических параметров трещин происходит при большем количестве дефектов, чем в покрытиях большей толщины при тех же условиях приложения нагрузки [7; 8].

Кроме того, необходимо отметить, что при относительном удлинении образцов до 20,0 % на поверхности покрытий ZrN толщиной до 0,7 мкм не обнаружено признаков отслоения либо скалывания.

Заключение

На основании результатов проведенного исследования были сделаны следующие выводы.

1. При заданном режиме нанесения покрытия ZrN методом реактивного магнетронного распыления формируется тонкопленочный материал с гранецентрированной кубической решеткой, структура которого соответствует фазе B1 для бинарных соединений (структура типа NaCl). Преобладание пика рефлекса (311) на фоне рефлексов (111) и (200) свидетельствует об осевой структурированности покрытия. Кроме того, было отмечено, что установленный режим нанесения покрытия ZrN обеспечивает формирование покрытия с умеренными значениями двухосных сжимающих остаточных напряжений (на уровне 720–800 МПа).

2. Возникновение трещин в покрытиях ZrN толщиной 0,3–0,7 мкм, формируемых методом реактивного магнетронного распыления на основах из стали марки ШХ15, в условиях одноосного растяжения наблюдается при относительном удлинении образцов 3,0–0,5 % соответственно, что существенно ниже величин деформаций контактирующих деталей шариковых подшипников. Так, согласно полученным ранее результатам компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния однорядного радиального шарикового подшипника 305A [9; 10] в диапазоне динамической и стационарной грузоподъемности возникают относительные деформации тел качения до 0,1 %.

Библиографические ссылки

1. Котов СЮ, Беляев ГЯ. Влияние вакуумно-плазменного упрочнения элементов качения на долговечность подшипника. *Наука и техника*. 2014;2:57–61. EDN: SYNDNX.
2. Спришевский АИ. Процессы в поверхностных слоях деталей подшипников и их изнашивание. В: *Технология подшипникоостроения. Выпуск 17*. Москва: Научно-исследовательский и экспериментальный институт подшипниковой промышленности; 1958. с. 161–168.
3. Котов СЮ, Беляев ГЯ. Триботехнические характеристики одноэлементных PVD-покрытий. *Трение и износ*. 2013;34(4): 371–376. EDN: RDJAEV.
4. Котов СЮ, Беляев ГЯ. Методика оценки характеристик вакуумно-плазменных покрытий с целью использования в узлах трения. *Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Машиностроение*. 2013;4:74–76. EDN: VPPTEO.
5. Noyan IC, Huang TC, York BR. Residual stress / strain analysis in thin films by X-ray diffraction. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 1995;20(2):125–177. DOI: 10.1080/10408439508243733.
6. Schoderböck P, Köstenbauer H. Residual stress determination in thin films by X-ray diffraction and the widespread analytical practice applying a biaxial stress model: an outdated oversimplification? *Applied Surface Science*. 2021;541:148531. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.148531.
7. Dmitriev AI, Nikonov AYU, Österle W. Molecular dynamics sliding simulations of amorphous Ni, Ni – P and nanocrystalline Ni films. *Computational Materials Science*. 2017;129:231–238. DOI: 10.1016/j.commatsci.2016.12.039.
8. Шугуров АР, Панин АВ, Дмитриев АИ, Никонов АЮ. Закономерности многоуровневого разрушения покрытий Ti – Al – N в процессе одноосного растяжения. *Физическая мезомеханика*. 2020;23(5):56–68. EDN: XNNHYZ.
9. Шмелев АВ, Котов СЮ, Беляев ГЯ. Разработка математической модели взаимодействия элементов качения и кольца шарикового подшипника. *Вестник Белорусско-Российского университета*. 2015;4:94–102. DOI: 10.53078/20778481_2015_4_94.
10. Шмелев АВ, Котов СЮ, Беляев ГЯ. Численное исследование напряженно-деформированного состояния деталей подшипников качения. *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого*. 2017;1:27–33. EDN: YZFSLJ.

Получена 15.07.2025 / исправлена 03.08.2025 / принята 03.08.2025.
Received 15.07.2025 / revised 03.08.2025 / accepted 03.08.2025.