

## ФРЕТТИНГ-ИЗНАШИВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ TiZrN, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

А.В. Кушнеров, В.А. Кукареко  
*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,  
ул. Академическая 12, Минск 220072, Беларусь,  
kushnerou@mail.ru, v\_kukareko@mail.ru*

Исследовано фреттинг-изнашивание в различных условиях трения сплава Zr-2.5%Nb и полученного методом магнетронного распыления покрытия TiZrN, нанесенного на сплав Zr-2.5%Nb. Установлено, что наибольшая интенсивность изнашивания сплава Zr-2.5%Nb регистрируется при трении в условиях адгезионного взаимодействия (сухое трение). При испытаниях в воде и в 5% водном растворе NaCl интенсивность фреттинг-изнашивания уменьшается в 2.3 раза, что связано с появлением водной прослойки между поверхностями трения. Нанесение методом магнетронного распыления наноразмерного покрытия TiZrN увеличивает износостойкость сплава Zr-2.5%Nb с покрытием в 5.8 раз в условиях сухого трения и в 2.5 раза – в условиях трения в 5% водном растворе NaCl и в воде по сравнению со сплавом Zr-2.5%Nb.

**Ключевые слова:** цирконий; покрытия TiZrN; магнетронное осаждение; износостойкость; фреттинг.

## FRETTING WEAR OF NANOSTRUCTURED TiZrN COATINGS DEPOSITED BY MAGNETRON SPRAYING

A.V. Kushnerou, V.A. Kukareko  
*The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,  
12 Akademicheskaya Str., 220072 Minsk, Belarus,  
kushnerou@mail.ru, v\_kukareko@mail.ru*

The fretting wear under various friction conditions of the Zr-2.5%Nb alloy and the TiZrN coating obtained by the method of magnetron sputtering deposited on the Zr-2.5%Nb alloy was studied. It has been established that the highest wear intensity of the Zr-2.5%Nb alloy is recorded during friction under conditions of adhesive interaction (dry friction). When tested in water and in a 5% NaCl aqueous solution, the intensity of fretting wear decreases by a factor of 2.3, which is associated with the appearance of an aqueous layer between the friction surfaces. The application of a TiZrN nanoscale coating by magnetron sputtering increases the wear resistance of the coated Zr-2.5%Nb alloy by 5.8 times under dry friction conditions and by 2.5 times under friction conditions in a 5% aqueous solution of NaCl and in water according to compared with the Zr-2.5%Nb alloy. In this case, the intensity of the fretting wear of the TiZrN coating is practically independent of the test conditions.

**Keywords:** zirconium; TiZrN coatings; magnetron deposition; wear resistance; fretting.

### Введение

Фреттинг является специфическим видом изнашивания рабочих поверхностей деталей машин и возникает на контактирующих металлических поверхностях в условиях малой амплитуды взаимного перемещения [1-4]. Такое движение может быть обусловлено вибрациями с относительно малым перемещением деталей, периодическим изгибом и другими деформациями. Из-за малой амплитуды относительного перемещения деталей при фреттинге, про-

дукты износа не удаляются, а накапливаются между контактирующими поверхностями, что приводит к образованию частиц оксидов и других соединений, которые действуют как абразив и увеличивают износ элементов трибосопряжения [5]. Фреттинг часто наблюдается в соединениях, полученных горячей посадкой и прессованием, болтовых и шпоночных соединениях, местах установки колец подшипников качения на вал, электрических контактах и тепловыделяющих элементах (ТВЭ-

Лах) ядерных реакторов. Влияние фреттинга на долговечность изделий проявляется наиболее существенно в точных приборах и механизмах.

Для снижения ущерба, вызываемого фреттингом, применяются конструктивно-технологические методы [6, 7], включающие защиту поверхности от процессов разрушения. В качестве таких мер используется замена материалов, изменение геометрии контакта, упрочнение контактирующих поверхностей и их защита от воздействия окислительной среды [8]. В настоящее время перспективным направлением для улучшения служебных свойств изделий, является модификация поверхностных слоев и использование защитных покрытий. Одним из наиболее эффективных способов получения покрытий является метод вакуумного осаждения (Physical Vapor Deposition или PVD) [9, 10]. Такие покрытия широко используются для защиты поверхностей от коррозии, а также для увеличения срока службы режущего инструмента. Перспективным для осаждения покрытий является метод магнетронного распыления композиционных мишеней [11,12]. Сформированные методом магнетронного распыления покрытия имеют наноразмерную структуру и высокие физико-механические характеристики. Повышенная твердость, коррозионная стойкость, низкий коэффициент трения PVD покрытий могут обеспечить эффективную защиту от повреждений, вызванных фреттингом [8].

В связи с этим целью настоящей работы является исследование фреттинг-изнашивания сплава Zr-2.5%Nb и покрытия TiZrN, полученного методом магнетронного распыления.

#### Методики и материалы исследований

В качестве материала для исследования выбран сплав Zr-2.5%Nb, применяемый в качестве конструкционных материалов ТВЭЛов. Нанесение покрытий TiZrN производилось методом реактивного магнетронного распы-

ления на установке, собранной на базе вакуумной камеры ВУ-1а и оснащенной магнетроном постоянного тока, дополнительным соленоидом для реализации ионной бомбардировки растущего покрытия, и блоком напряжения смещения на подложке. Толщина покрытия составляла 3 мкм.

Испытания образцов на износостойкость в условиях фреттинга проводилось с помощью установки и методики, представленных в [13]. Условия испытаний: трение без смазочного материала, в 5% водном растворе NaCl и в воде. Номинальная нагрузка составляла 3 МПа, амплитуда перемещения образца составляла 0.075 мм. Испытания проводились до достижения 20 млн. циклов.

Фотографирование поверхности образцов после фреттинг-изнашивания выполнялось на микроскопе Альтами МЕТ 1МТ.

#### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены значения интенсивности фреттинг-изнашивания от пути трения после испытаний на фреттинг образцов Zr2,5%Nb сплава в различных условиях трения. Можно видеть, что наибольшая интенсивность изнашивания регистрируется после трения в условиях адгезионного взаимодействия (сухое трение). Фреттинг в условиях испытаний в воде и 5% водном растворе NaCl сопровождается уменьшением интенсивности изнашивания в  $\approx 2.3$  раза.

На рис. 2 представлены фотографии поверхности трения сплава Zr-2.5%Nb на различных стадиях фреттинг-изнашивания в условиях трения без смазочного материала. Из рис. 2б видно, что в результате фрикционного взаимодействия трибопары (Zr-2.5%Nb)-(Zr-2.5%Nb) на поверхности образца Zr-2.5%Nb регистрируются участки адгезионного изнашивания. При этом интенсивность изнашивания достигает  $(2-3) \cdot 10^{-9}$ . Уменьшение интенсивности фреттинг-изнашивания в 2.3 раза при испытаниях в воде может быть связано с появлением водной прослойки между поверхностями трения, что предотвращает

адгезионное взаимодействие и накопление продуктов износа в трибосопряжении.

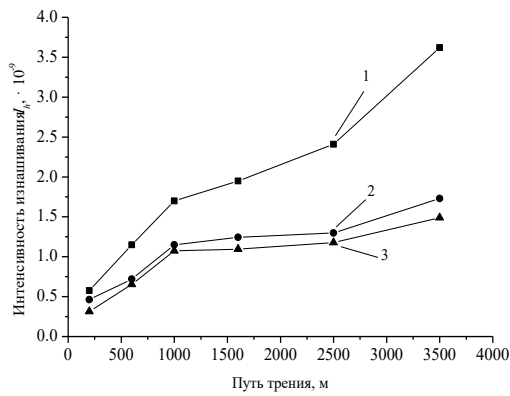


Рис. 1. Зависимость интенсивности фреттинг-изнашивания сплава Zr-2.5%Nb от пути трения в различных условиях: 1 – сухое трение; 2 – испытания в 5% водном растворе NaCl; 3 – испытания в воде

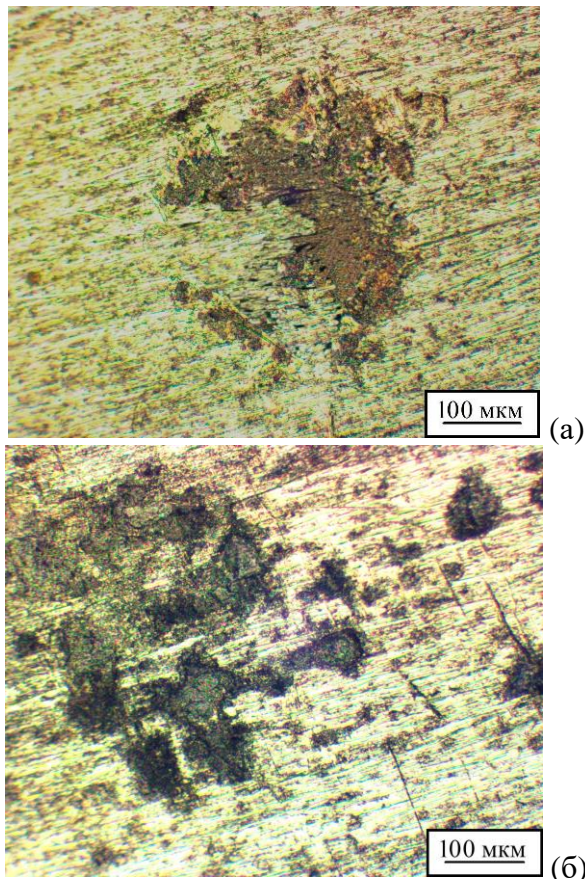


Рис. 2. Фотографии поверхности трения сплава Zr-2.5%Nb на различных стадиях фреттинг-изнашивания в условиях трения без смазочного материала: а – после 10 млн. циклов испытаний; б – после испытаний (20 млн. циклов)

На рис. 3 представлены значения интенсивности фреттинг-изнашивания от пути

трения после испытаний на фреттинг образцов покрытий TiZrN в различных условиях трения.

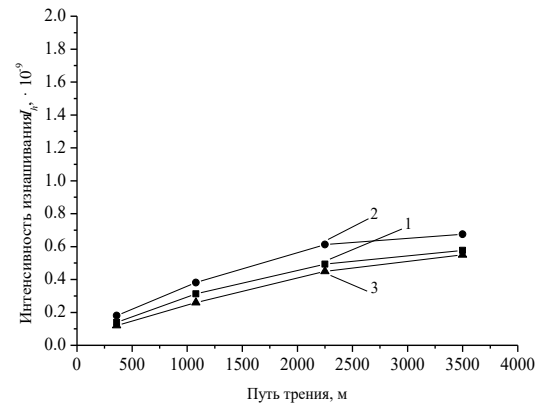


Рис. 3. Зависимость интенсивности фреттинг-изнашивания покрытий TiZrN от пути трения в различных условиях: 1 – сухое трение; 2 – испытания в 5% водном растворе NaCl; 3 – испытания в воде

Из данных на рис. 1 и 3 можно заключить, что нанесение покрытия TiZrN увеличивает износостойкость сплава Zr-2.5%Nb в 5.8 раз в условиях адгезионного взаимодействия (сухого трения) и в 2.5 раза – в условиях трения в 5% водном растворе NaCl и в воде, что связано с высокими прочностными и антикоррозионными свойствами покрытия. Вместе с тем, необходимо отметить, что фреттинг-изнашивание покрытий TiZrN в среде 5% водного раствора NaCl несколько превышает износ покрытия в воде и в условиях сухого трения (рис. 3).

На рис. 4 представлены фотографии поверхности трения покрытия TiZrN на различных стадиях фреттинг-изнашивания при трении в воде. Участки адгезионного изнашивания на поверхности покрытия отсутствуют.

### Заключение

Исследовано фреттинг-изнашивание сплава Zr-2.5%Nb и покрытия TiZrN в различных условиях трения.

Установлено, что наибольшая интенсивность изнашивания сплава Zr-2.5%Nb регистрируется при трении в условиях адгезионного взаимодействия (сухое тре-

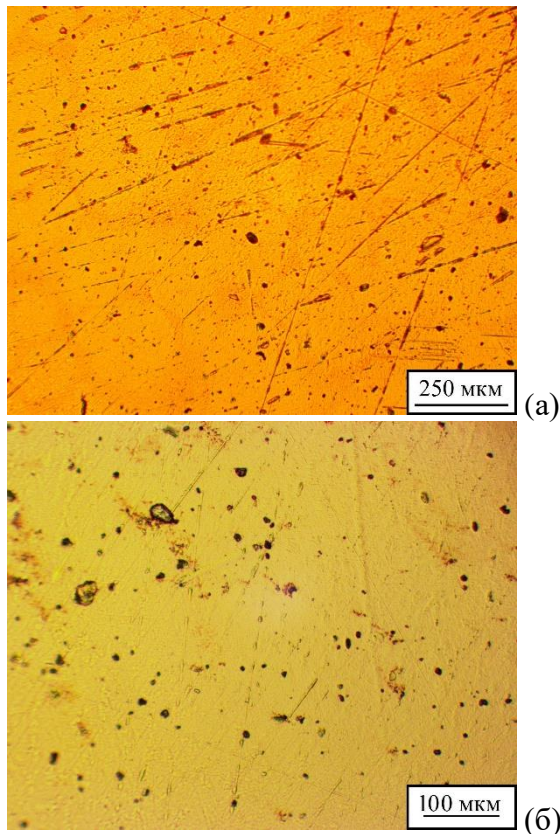


Рис. 4. Фотографии поверхности трения покрытий TiZrN на различных стадиях фреттинг-изнашивания в воде: а – после 10 млн. циклов испытаний; б – после испытаний (20 млн. циклов)

ние). При испытаниях в воде и в 5% водном растворе NaCl интенсивность фреттинг-изнашивания уменьшается в 2.3 раза, что связано с появлением водной прослойки между поверхностями трения.

Нанесение методом магнетронного распыления наноразмерного покрытия TiZrN увеличивает износостойкость сплава Zr-2.5%Nb с покрытием в 5.8 раз в условиях сухого трения и в 2.5 раза – в условиях трения в 5% водном растворе NaCl и в воде по сравнению со сплавом Zr-2.5%Nb. При этом интенсивность фреттинг-изнашивания покрытия TiZrN практически не зависит от условий испытаний.

### Библиографические ссылки

1. Tomlinson G.A., Thorpe P.L., Gough H.J. An Investigation of the Fretting Corrosion of Closely Fitting Surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 1939; 141(1): 223-249.
2. Campbell W.E. Symposium on Fretting corrosion. *The American Society for Testing and Materials. Special Technical Publication* 1953; (114): 3.
3. Geringer J., Forest, B., Combrade, P. Fretting-corrosion of materials used as orthopaedic implants. *Wear* 2005; 259: 943-951.
4. Korsunsky A.M., Torosyan A.R., Kim K. Development and characterization of low friction coatings for protection against fretting wear in aerospace components. *Thin Solid Film* 2008; 516: 5690-5699.
5. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техніка; 1974. 272 с.
6. Алисин В.В., Алябьев А.Я., Архаров А.М., Балакин В.А., Белый В.А., Бадыштова К.М. и др. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. Книга 1. Москва: Машиностроение; 1978. 400 с.
7. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. Справочник. Москва: Машиностроение; 1986. 224 с.
8. Lifeng Ma, Kilho Eom, Jean Geringer, Tea-Sung Jun, Kyungmok Kim. Literature Review on Fretting Wear and Contact Mechanics of Tribological Coatings. *Coatings* 2019; 9(8): 501.
9. Емельянов В.А., Иванов И.А., Мрочек Ж.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. Минск: Бест-принт; 1998. 234 с.
10. Дороднов А.М., Петросов В.А. О физических принципах и типах вакуумных технологических устройств. *Журнал технической физики* 1981; 5(3): 504-524.
11. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. Москва: Радио и связь; 1982. 72 с.
12. Рогов А.В., Капустин Ю.В., Мартыненко Ю.В. Факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Критерии оптимизации. *Журнал технической физики* 2015; 85(2): 126-134.
13. Кушнеров А.В., Шапарь В.А. Установка и методика экспериментальных исследований изнашивания материалов и покрытий в условиях фреттинг-коррозии. *Актуальные вопросы машиноведения* 2020; 9: 330-332.