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 Zr2.5%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 Zr2.5%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, продукты 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 распыления 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 ≈ 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 $(2\text{-}3)\cdot 10^{-9}$. 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.

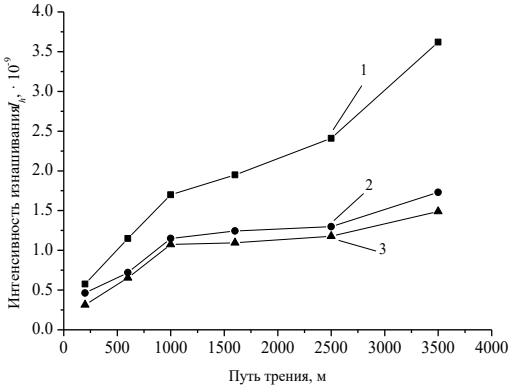
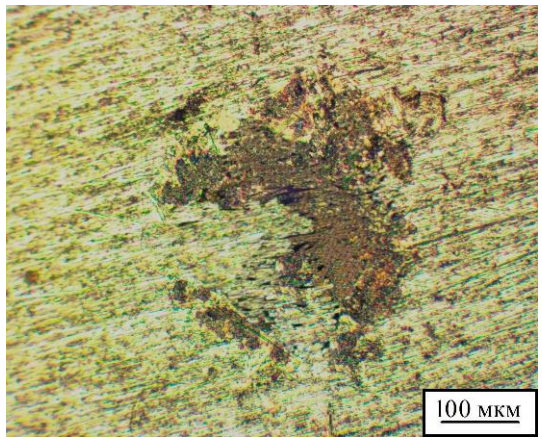
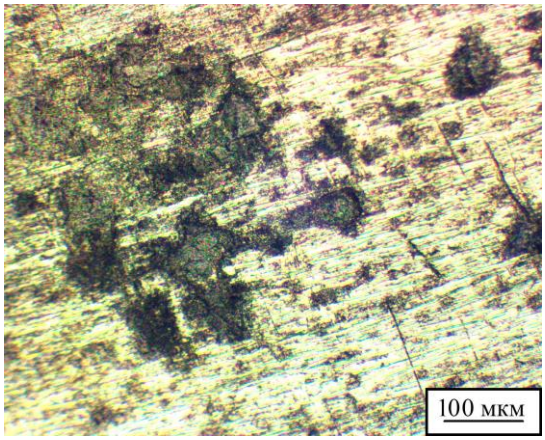


Рис. 1. Зависимость интенсивности фреттинг-изнашивания сплава Zr-2.5%Nb от пути трения в различных условиях: 1 – сухое трение; 2 – испытания в 5% водном растворе NaCl; 3 – испытания в воде



(а)



(б)

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.

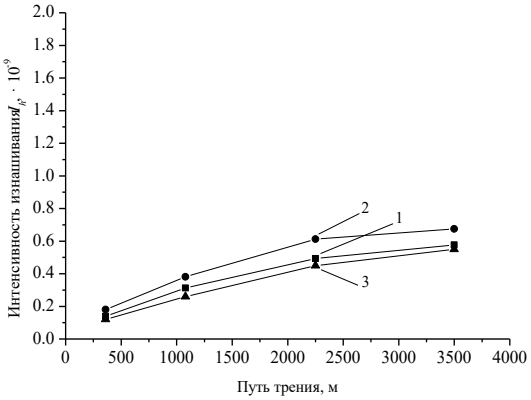


Рис. 3. Зависимость интенсивности фреттинг-изнашивания покрытий TiZrN от пути трения в различных условиях: 1 – сухое трение; 2 – испытания в 5% водном растворе NaCl; 3 – испытания в воде

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-

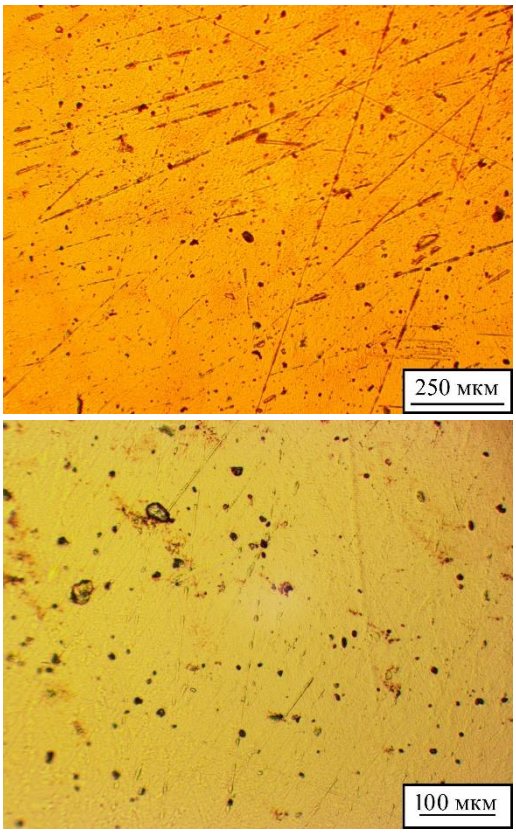


Рис. 4. Фотографии поверхности трения покрытий TiZrN на различных стадиях фреттинг-изнашивания в воде: а – после 10 млн. циклов испытаний; б – после испытаний (20 млн. циклов)

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: Бестпринт; 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., Мартныненко 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.