



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.178.16, 621.793, 621.891

А.В. КУШНЕРОВ

научный сотрудник центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения коллективного пользования НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹

E-mail: kushnerou@mail.ru

Ю.В. БЕЛЯНКО

техник центра структурных исследований и трибомеханических испытаний материалов и изделий машиностроения коллективного пользования НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование»¹

E-mail: yraabelyaa@gmail.com

С.В. КОНСТАНТИНОВ, канд. физ.-мат. наук, доц.

ведущий научный сотрудник лаборатории элионики²

E-mail: SVKonstantinov@bsu.by

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук, проф.

заведующий кафедрой «Материаловедение в машиностроении»³

E-mail: konstantinov@bntu.by

Т.В. ШЕЛКОВАЯ, канд. физ.-мат. наук, доц.

старший научный сотрудник⁴

E-mail: shoukavaya_t@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

²НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ, г. Минск, Республика Беларусь

³Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

⁴Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 22.09.2025.

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА ВАКУУМНО-ДУГОВЫХ ПОКРЫТИЙ TiN НА ИХ НАГРУЗКУ ОТСЛАИВАНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ФРЕТТИНГ-ИЗНАШИВАНИЮ

Исследовано влияние отжига вакуумно-дугового покрытия TiN на его износостойкость в условиях фреттинга и нагрузку отслаивания. Установлено, что покрытие в исходном состоянии содержит TiN с гранецентрированной решеткой и Ti с гексагональной плотноупакованной решеткой и его фазовый состав в процессе отжига при 300–500 °С не изменяется. После отжига покрытия при 550 °С в его фазовом составе регистрируются TiN, Ti и TiO₂. Показано, что отжиг покрытия при 350–400 °С способствует повышению сопротивления фреттинг-изнашиванию на 10 % и возрастанию нагрузки отслаивания. В результате отжига при 450–500 °С нагрузка отслаивания сохраняется на высоком уровне, а после отжига при 550 °С резко падает. Износостойкость покрытий в интервале температур отжига 450–550 °С снижается до 20 %. Сделано заключение, что увеличение нагрузки отслаивания покрытия после отжига при 350–500 °С связано с образованием на поверхности покрытия пленки низших оксидов титана, выступающих в качестве твердой смазки и препятствующих зарождению дислокаций, появлению микротрещин на границе покрытия с подложкой при скретч-тестировании. Снижение нагрузки отслаивания в результате отжига при 550 °С и износостойкости после отжига при температурах 450–550 °С вызвано разупрочнением покрытия.

Ключевые слова: покрытия TiN, вакуумно-дуговое осаждение, отжиг, нанотвердость, нагрузка отслаивания, износостойкость, фреттинг

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-75-80>

Введение. Фреттинг — вид изнашивания поверхностей деталей машин, возникающий при малых взаимных перемещениях контактирующих поверхностей [1–4]. Это явление особенно характерно для соединений, подверженных вибрациям и переменным нагрузкам, таких как болтовые и шпоночные соединения, подшипниковые узлы, а также элементы электротехнического и энергетического оборудования. Продукты износа, образующиеся в процессе фреттинга, не только ухудшают качество поверхности, но и создают абразивные частицы, ускоряющие разрушение материала [5], что может значительно снизить ресурс работоспособности ответственных деталей и узлов машин [6].

Для борьбы с фреттинг-изнашиванием применяют различные методы, включающие оптимизацию конструкции соединений, упрочнение поверхностного слоя, а также защитных покрытий [6–8]. При этом особый интерес представляют PVD-покрытия (например, нитрид титана — TiN), которые обладают высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью [9, 10]. Эти покрытия находят применение в машиностроении, авиакосмической отрасли и инструментальном производстве. Однако эксплуатационные свойства и нагрузка отслаивания покрытий от подложки во многом зависят от технологии их нанесения и режимов последующей термической обработки.

В связи с этим *целью работы* являлось исследование влияния температуры отжига покрытий TiN на нагрузку отслаивания покрытий и сопротивление фреттинг-изнашиванию.

Материалы исследований. Объектом исследования являются образцы покрытий TiN, сформированных методом вакуумно-дугового осаждения на подложках из предварительно отожженной стали 9XC (твердость 270 HV 10). Нанесение покрытий проводилось на специализированной установке модели PVM-0,5FN. Режим нанесения: ток — 85 А, температура — 190 °С, давление — $3 \cdot 10^{-3}$ МПа, время нанесения покрытия — 30 мин. Толщина покрытий составляет ~2 мкм.

Термическая обработка покрытий проводилась при температурах 350–550 °С и выдержке в течение часа.

Исследование фазового состава образцов проводилось на дифрактометре POWDIX 600 в монохроматизированном CoK_α -излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Съемки осуществлялись в непрерывном режиме со скоростью 0,01 град/с. Для расшифровки фазового состава использовалась картотека стандартных спектров

PDF. Обработка данных рентгеноструктурного анализа осуществлялась с помощью программного комплекса Crystallographica Search-Match.

Нанотвердость и модуль упругости покрытий измерялись на нанотвердоме Nano Hardness Tester (NHT2) фирмы CSM Instruments по методике Оливера и Фарра [11, 12] с применением алмазного индентора Берковича. Нагрузка на индентор составляла 5 г.

Испытания образцов на износостойкость в условиях фреттинга проводились по методу из [13]. В качестве контртела использовалась пластина из сплава Zr-2,5%Nb. Номинальная нагрузка p составляла 4 МПа, амплитуда перемещения образца A — 0,3 мм. Испытания проводились до достижения 20 млн циклов.

Результаты и их обсуждение. Рентгеновская дифрактограмма покрытия TiN, нанесенного на подложку из стали 9XC в исходном состоянии, представлена на рисунке 1 *a*. В фазовом составе покрытия регистрируются фазы нитрида титана TiN с гранцентрированной (ГЦК) решеткой типа NaCl и титана Ti с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) решеткой (см. рисунок 1 *a*). Присутствие на дифрактограммах линий Ti связано с наличием капельной фракции в расплавленном титане. Параметр кристаллической решетки a фазы TiN в исходном состоянии составляет 0,4253 нм. Нанотвердость покрытия TiN составляет 29 ГПа, а значение модуля упругости E — 485 ГПа. На рентгенограммах исследуемых покрытий (см. рисунок 1) также присутствуют дифракционные линии от фаз подложки α -Fe и Fe_3C , что связано с малой толщиной покрытия. Отжиг покрытия при температурах 350–500 °С не приводит к изменениям в его фазовом составе. Однако при этом на поверхности покрытия регистрируются цвета побежалости от желтого (отжиг при 350–400 °С) до фиолетового (отжиг при 450–500 °С), что свидетельствует об образовании на поверхности пленки низших оксидов титана (типа Ti_3O , Ti_2O и Ti_3O_2), которые вследствие их малой толщины не обнаруживаются на дифрактограммах. После отжига при 550 °С поверхность покрытия становится белой, что указывает на образование достаточно толстой пленки оксида TiO_2 (рутил). На рисунке 1 *b* приведена характерная дифрактограмма покрытия TiN, подвергнутого отжигу при температуре 550 °С. Можно видеть, что после указанного отжига в вакуумно-дуговом покрытии TiN регистрируются фазы TiN, Ti, а также оксид титана TiO_2 (см. рисунок 1 *b*). Параметр кристаллической решетки фазы TiN при

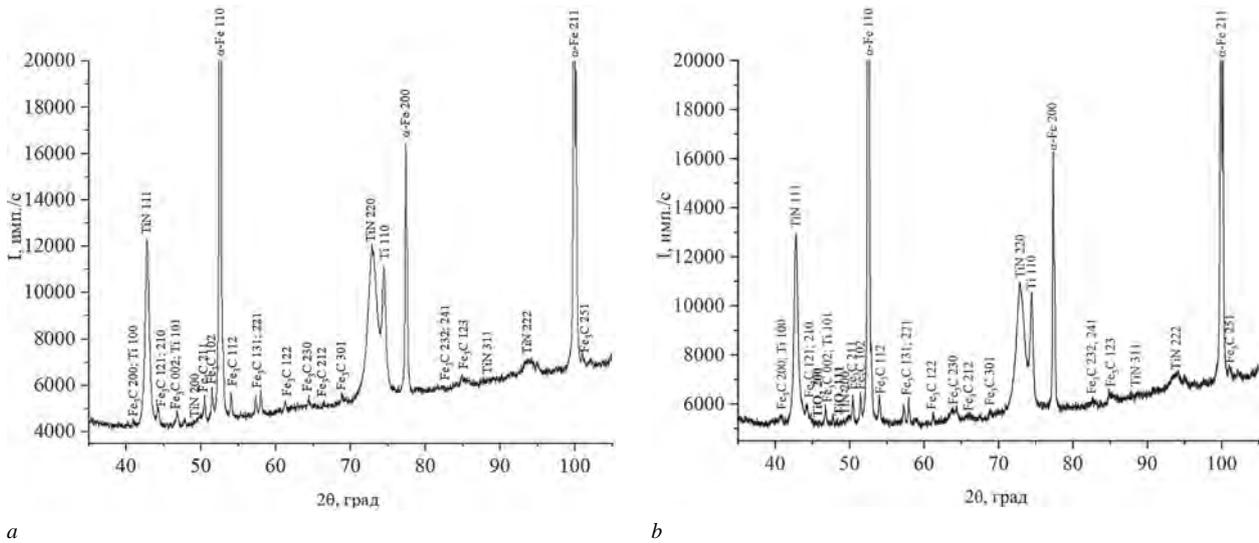


Рисунок 1 — Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK α) от поверхностного слоя покрытия TiN, осажденного на сталь 9XC в исходном состоянии (a) и подвергнутого отжигу при 550 °C в течение 1 ч (b)
Figure 1 — Fragments of X-ray diffraction patterns (CoK α) from the surface layer of the TiN coating deposited on 9CrSi steel in the initial state (a) and subjected to annealing at 550 °C for 1 h (b)

этом сохраняется на уровне исходного состояния ($a = 0,4253$ нм). Вместе с тем в результате отжига существенно уменьшается плотность дефектов кристаллической решетки покрытия и возрастает размер субзерен [14], что приводит к снижению величины физического уширения дифракционных линий (см. рисунок 1 b).

На рисунке 2 представлена зависимость нанотвердости покрытия от температуры его отжига. Можно видеть, что низкотемпературный отжиг (350–400 °C) покрытия не приводит к существенному уменьшению его твердости. После отжига при 450–550 °C регистрируется сильное снижение нанотвердости TiN. Значения модуля упругости E при этом понижаются до 220–260 ГПа. Указанные изменения нанотвердости покрытия связаны с уменьшением плотности дефектов кристаллической решетки и увеличением размера субзеренной структуры [14].

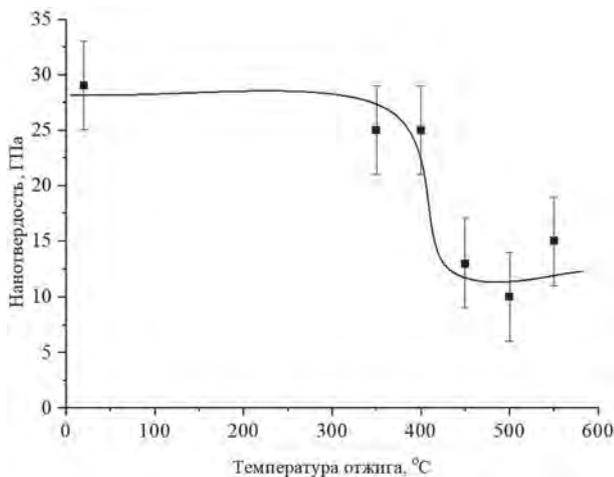


Рисунок 2 — Зависимость нанотвердости покрытий TiN, осажденных на сталь 9XC, от температуры отжига
Figure 2 — Dependence of nanohardness of TiN coatings deposited on 9CrSi steel on annealing temperature

В результате отжига вакуумно-дуговых покрытий TiN, нанесенных на предварительно отожженную сталь 9XC, нагрузка отслаивания L_c увеличивается от 12,8 до 21,1 Н (отжиг при 500 °C), а после отжига при 550 °C резко падает до 13,4 Н (рисунок 3). Обнаруженная зависимость возрастания нагрузки отслаивания покрытия от температуры его отжига связана, по нашему мнению, с образованием на поверхности TiN тонкого слоя низших оксидов титана (Ti_3O , Ti_2O и Ti_3O_2), имеющих гексагональную решетку [15] и выступающих в качестве твердой смазки. При этом наличие пленки низших оксидов титана препятствует зарождению на поверхности покрытия TiN дислокаций при внедрении индентора в процессе скретч-тестирования, что тормозит накопление дислокаций на границе между покрытием и подложкой и, в свою очередь, замедляет процесс образования микротрещин на границе [14]. Сни-

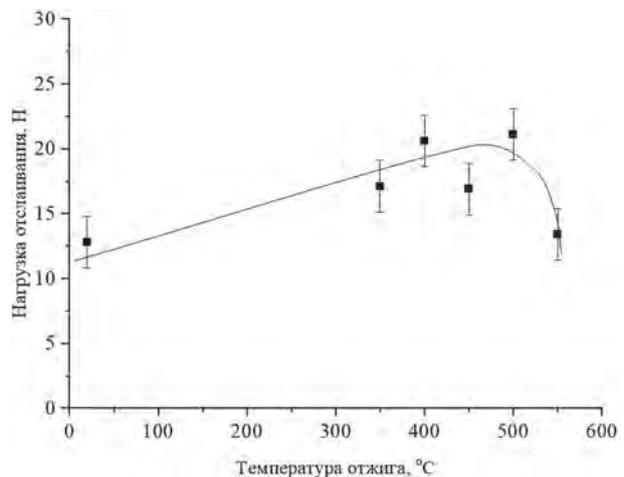


Рисунок 3 — Зависимость нагрузки отслаивания покрытий TiN, осажденных на сталь 9XC, от температуры отжига
Figure 3 — Dependence of the peel load of TiN coatings deposited on 9CrSi steel on the annealing temperature

жение нагрузки отслаивания после отжига при 550 °С связано как с сильным разупрочнением покрытия в процессе термической обработки, что обусловлено облегченным зарождением в нем дислокаций, так и с изменением фазового состава оксидной пленки. Образование в результате отжига при 550 °С оксида с повышенным содержанием кислорода (типа TiO_2), обладающего высокой твердостью и хрупкостью, приводит к исчезновению твердосмазочных свойств оксидной пленки и снижению нагрузки отслаивания (см. рисунок 3).

На рисунке 4 представлены результаты исследования износостойкости покрытий TiN в условиях фреттинга при трении без смазочного материала. Отжиг при 350–400 °С (см. рисунок 4, кривые 2, 3) приводит к увеличению износостойкости покрытия примерно на 10 %. Указанное явление связано с улучшением адгезионных свойств покрытий (увеличением нагрузки отслаивания), сопровождающимся незначительным уменьшением их твердости. При испытаниях покрытий TiN, подвергнутых отжигу при 450–550 °С (см. рисунок 4, кривые 4–6), линейный износ возрастает до 20 %, что связано с разупрочнением покрытий. При этом наиболее интенсивный износ регистрируется после высокотемпературного отжига при 550 °С, что обусловлено попаданием в зону трения твердых и хрупких частиц оксидов TiO_2 .

На рисунке 5 представлены фотографии поверхности трения покрытия TiN, подвергнутого отжигу на различных стадиях фреттинг-изнашивания в условиях трения без смазочного материала. Видно, что в результате фрикционного вза-

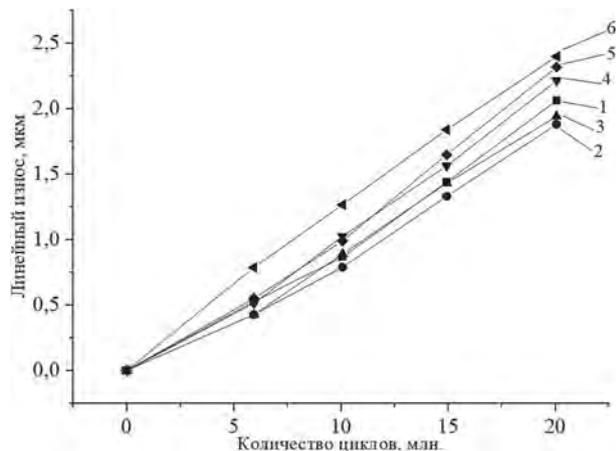
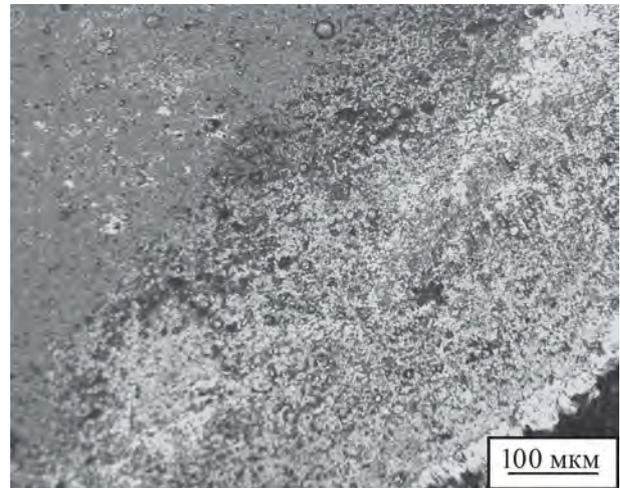
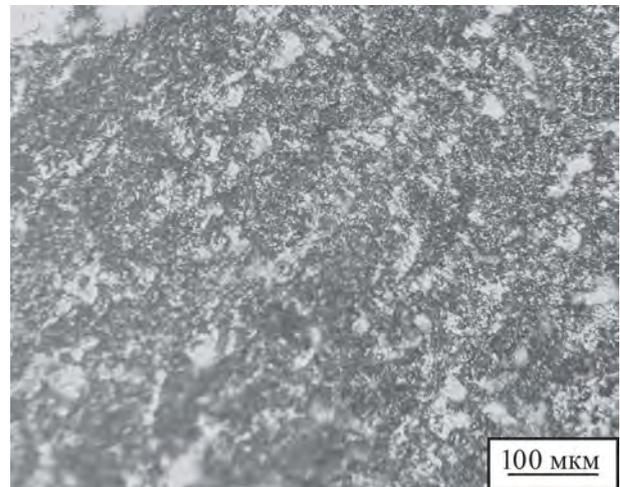


Рисунок 4 — Зависимость линейного износа вакуумно-дугового покрытия TiN в условиях фреттинга от числа циклов испытаний при трении без смазочного материала ($p = 4$ МПа, $A = 0,3$ мм): 1 — в исходном состоянии; после отжига в течение 1 ч: 2 — при 350 °С; 3 — при 400 °С; 4 — при 450 °С; 5 — при 500 °С; 6 — при 550 °С
Figure 4 — Dependence of linear wear of vacuum-arc TiN coating under fretting conditions on the number of test cycles under friction without lubricant ($p = 4$ МПа, $A = 0.3$ мм): 1 — initial state; after annealing for 1 h: 2 — at 350 °С; 3 — at 400 °С; 4 — at 450 °С; 5 — at 500 °С; 6 — at 550 °С



a



b

Рисунок 5 — Фотографии поверхности трения покрытия TiN после фреттинг-изнашивания в условиях трения без смазочного материала (20 млн циклов): a — в исходном состоянии; b — после отжига при 500 °С в течение 1 ч
Figure 5 — Photographs of the friction surface of TiN coating after fretting wear under friction without lubricant (20 million cycles): a — initial state; b — after annealing at 500 °С for 1 h

имодействия трибосопряжения TiN–Zr-2,5%Nb на поздних стадиях испытаний на поверхности покрытия регистрируются участки адгезионно-абразивного изнашивания [16].

Выводы. Исследовано влияние отжига вакуумно-дугового покрытия TiN на его износостойкость в условиях фреттинга и нагрузку отслаивания. Установлено, что покрытие в исходном состоянии содержит TiN с ГЦК-решеткой и Ti с ГПУ-решеткой. В результате отжига при 300–500 °С фазовый состав покрытия не изменяется, а на поверхности регистрируется образование цветов побежалости, свидетельствующих о формировании тонкой оксидной пленки. После отжига покрытия при 550 °С в его фазовом составе регистрируются TiN, Ti и TiO_2 . Показано, что отжиг покрытия при 350–400 °С способствует повышению сопротивления фреттинг-изнашиванию на 10 % и возрастанию нагрузки отслаивания. В результате отжига при 450–500 °С нагрузка от-

слаивания сохраняется на высоком уровне, а после отжига при 550 °С резко падает. В то же время износостойкость покрытий в интервале температур отжига 450–550 °С снижается до 20 %. Сделано заключение, что увеличение нагрузки отслаивания покрытия после отжига при 350–500 °С связано с образованием на поверхности покрытия пленки низших оксидов титана, выступающих в качестве твердой смазки и препятствующих зарождению дислокаций, а также появлению микротрещин на границе покрытия с подложкой при скретч-тестировании. Интенсивное разупрочнение покрытия в результате отжига при 450–550 °С приводит к снижению его износостойкости несмотря на высокое сопротивление отслаиванию. Наиболее интенсивный износ после высокотемпературного отжига при 550 °С обусловлен как разупрочнением покрытия, так и попаданием в зону трения твердых и хрупких частиц оксидов TiO₂.

Список литературы

- Geringer, J. Fretting-corrosion of materials used as orthopaedic implants / J. Geringer, B. Forest, P. Combrade // *Wear*. — 2005. — Vol. 259, iss. 7–12. — P. 943–951. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.027>.
- Korsunsky, A.M. Development and characterization of low friction coatings for protection against fretting wear in aerospace components / A.M. Korsunsky, A.R. Torosyan, K. Kim // *Thin Solid Film*. — 2008. — Vol. 516, iss. 16. — P. 5690–5699. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.07.056>.
- Голего, Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля. — Киев: Техніка, 1974. — 270 с.
- Literature review on fretting wear and contact mechanics of tribological coatings / L. Ma, K. Eom, J. Geringer [et al.] // *Coatings*. — 2019. — Vol. 9, iss. 8. — DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings9080501>.
- Трение, изнашивание и смазка: справ.: в 2 кн. / В.В. Алисин, А.Я. Алябьев, А.М. Архаров [и др.]; под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. — М.: Машиностроение, 1978. — Кн. 1. — 400 с.
- Дроздов, Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: справ. / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. — М.: Машиностроение, 1986. — 224 с.
- Емельянов, В.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий / В.А. Емельянов, И.А. Иванов, Ж.А. Мрочек. — Минск: Бестпринт, 1998. — 284 с.
- Дороднов, А.М. О физических принципах и типах вакуумных технологических устройств / А.М. Дороднов, В.А. Петросов // *Журнал технической физики*. — 1981. — Т. 5, № 3. — С. 504–524.
- Musil, J. Hard nanocomposite coatings: thermal stability, oxidation resistance and toughness / J. Musil // *Surface and Coatings Technology*. — 2012. — Vol. 207. — P. 50–65. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.073>.
- Gleiter, H. Nanocrystalline materials / H. Gleiter // *Progress in Materials Science*. — 1989. — Vol. 33, iss. 4. — P. 223–315. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0079-6425\(89\)90001-7](https://doi.org/10.1016/0079-6425(89)90001-7).
- Oliver, W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G.M. Pharr // *Journal of Materials Research*. — 1992. — Vol. 7, iss. 6. — P. 1564–1583. — DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>.
- Oliver, W.C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology / W.C. Oliver, G.M. Pharr // *Journal of Materials Research*. — 2004. — Vol. 19, iss. 1. — P. 3–20. — DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>.
- Кушнеров, А.В. Установка и методика экспериментальных исследований изнашивания материалов и покрытий в условиях фреттинг-коррозии / А.В. Кушнеров, В.А. Шапарь // *Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]*. — Минск, 2020. — Вып. 9. — С. 330–332.
- Кукареко, В.А. Влияние отжига на структурно-фазовое состояние и физико-механические свойства вакуумно-дуговых покрытий TiN, нанесенных на сталь 9ХС / В.А. Кукареко, А.В. Кушнеров, Н.Н. Попок // *Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук*. — 2024. — Т. 60, № 4. — С. 344–352. — DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-4-344-352>.
- Гольдшмидт, Х.Дж. Сплавы внедрения: в 2 вып. / Х.Дж. Гольдшмидт; пер. с англ. С.Н. Горина, Б.А. Клыпина; под ред. Н.Т. Чеботарева. — М.: Мир, 1971. — Вып. 2. — 464 с.
- Affonso, L.O.A. Machinery failure analysis handbook: sustain your operations and maximize uptime / L.O.A. Affonso. — Gulf Publishing Company, 2006. — 308 p.

KUSHNEROU Andrey V.

Researcher of the Center of Structural Research and Tribomechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹
E-mail: kushnerou@mail.ru

BELYANKO Yuriy V.

Technician of the Center of Structural Research and Tribomechanical Testing of Materials and Mechanical Engineering Products of the R&D Center “Mechanical Engineering Technologies and Processing Equipment”¹
E-mail: yraabelyaa@gmail.com

KONSTANTINOV Stanislav V., Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Leading Researcher of the Elionics Laboratory²
E-mail: SVKonstantinov@bsu.by

KONSTANTINOV Valeriy M., D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department “Materials Science in Mechanical Engineering”³
E-mail: konstantinov@bntu.by

SHOUKAVAYA Tatyana V., Ph. D. in Phys. and Math., Assoc. Prof.

Senior Researcher⁴
E-mail: shoukavaya_t@mail.ru

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

³Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

⁴Scientific and Practical Center of the NAS of Belarus for Materials Science, Minsk, Republic of Belarus

Received September 22, 2025.

EFFECT OF VACUUM-ARC ANNEALING OF TiN COATINGS ON THEIR PEEL LOAD AND RESISTANCE TO FRETTING WEAR

The effect of vacuum-arc annealing of TiN coating on its wear resistance under fretting conditions and peel load is studied. It is found that the coating in the initial state contains TiN with a face-centered cubic lattice and Ti with a hexagonal close-packed lattice, and its phase composition does not change during annealing at 300–500 °C. After annealing the coating at 550 °C, TiN, Ti and TiO₂ are recorded in its phase composition. It is shown that annealing the coating at 350–400 °C contributes to an increase in fretting wear resistance by 10 % and an increase in the peel load. As a result of annealing at 450–500 °C, the peel load remains at a high level, and after annealing at 550 °C, it drops sharply. At the same time, the wear resistance of the coatings in the annealing temperature range of 450–550 °C decreases by 20 %. It is concluded that the increase in the coating peeling load after annealing at 350–500 °C is due to the formation of a film of lower titanium oxides on the coating surface, which act as a solid lubricant and prevent the nucleation of dislocations, as well as the appearance of microcracks at the coating-substrate boundary during scratch testing. The reduction of peel load as a result of annealing at 550 °C and wear resistance after annealing at 450–550 °C is caused by softening of the coating.

Keywords: TiN coatings, vacuum-arc deposition, annealing, nanohardness, peel load, wear resistance, fretting

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2026-1-74-75-80>

References

- Geringer J., Forest B., Combrade P. Fretting-corrosion of materials used as orthopaedic implants. *Wear*, 2005, vol. 259, iss. 7–12, pp. 943–951. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.027>.
- 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, vol. 516, iss. 16, pp. 5690–5699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.07.056>.
- Golego N.L., Alyabev A.Ya., Shevelya V.V. *Fretting-korroziya metallov* [Fretting corrosion of metals]. Kiev, Tekhnika Publ., 1974. 270 p. (in Russ.).
- Ma L., Eom K., Geringer J., Jun T.-S., Kim K. Literature review on fretting wear and contact mechanics of tribological coatings. *Coatings*, 2019, vol. 9, iss. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings9080501>.
- Alisin V.V., et al. *Trenie, iznashivanie i smazka. Kn. 1* [Friction, wear and lubrication. Book 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 400 p. (in Russ.).
- Drozdov Yu.N., Pavlov V.G., Puchkov V.N. *Trenie i iznos v ekstremnykh usloviyakh* [Friction and wear in extreme conditions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 224 p. (in Russ.).
- Emelyanov V.A., Ivanov I.A., Mrochek Zh.A. *Vakuumno-plazmennye sposoby formirovaniya zashchitnykh i uprochnyayushchikh pokrytiy* [Vacuum-plasma methods for the formation of protective and strengthening coatings]. Minsk, Bestprint Publ., 1998. 284 p. (in Russ.).
- Dorodnov A.M., Petrosov V.A. O fizicheskikh printsipakh i tipakh vakuumnykh tekhnologicheskikh ustroystv [On the physical principles and types of vacuum technological devices]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 1981, vol. 5, no. 3, pp. 504–524 (in Russ.).
- Musil J. Hard nanocomposite coatings: thermal stability, oxidation resistance and toughness. *Surface and coatings technology*, 2012, vol. 207, pp. 50–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.05.073>.
- Gleiter H. Nanocrystalline materials. *Progress in materials science*, 1989, vol. 33, iss. 4, pp. 223–315. DOI: [https://doi.org/10.1016/0079-6425\(89\)90001-7](https://doi.org/10.1016/0079-6425(89)90001-7).
- Oliver W.C., Pharr G.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of materials research*, 1992, vol. 7, iss. 6, pp. 1564–1583. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>.
- Oliver W.C., Pharr G.M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of materials research*, 2004, vol. 19, iss. 1, pp. 3–20. DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>.
- Kushnerou A.V., Shapar V.A. Ustanovka i metodika eksperimentalnykh issledovaniy iznashivaniya materialov i pokrytiy v usloviyakh fretting-korrozii [The plant and methodology for experimental researches of materials and coatings wear under fretting corrosion]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2020, iss. 9, pp. 330–332 (in Russ.).
- Kukareko V.A., Kushnerou A.V., Popok N.N. Vliyanie otzhiga na strukturno-fazovoe sostoyanie i fiziko-mekhanicheskie svoystva vakuumno-dugovykh pokrytiy TiN, nanesennykh na stal 9KhS [Influence of annealing on the structural-phase state and physical-mechanical properties of vacuum-arc TiN coatings applied to 9CrSi steel]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and mathematics series*, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 344–352. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-60-4-344-352> (in Russ.).
- Goldschmidt H.J. *Interstitial alloys*. New York, Springer, 1967. 632 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5880-8>.
- Affonso L.O.A. *Machinery failure analysis handbook: sustain your operations and maximize uptime*. Gulf Publishing Company, 2006. 308 p.