

УДК 620.178.16

## Сравнение стойкости ионно-плазменных вакуумно-дуговых покрытий Ti—Al—Ni—N и Ti—Al—Ni—Mo—N к изнашиванию и эрозии

Д.С. Белов<sup>1</sup>, В.С. Сергеевин<sup>1</sup>, И.В. Блинков<sup>1</sup>, Н.И. Смирнов<sup>2</sup>, А.В. Черногор<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Ленинский проспект, д. 4, г. Москва 119049, Россия.

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Малый Харитоньевский переулок, д. 4, г. Москва 101000, Россия.

Поступила в редакцию 26.06.2020.

После доработки 11.01.2021.

Принята к публикации 11.01.2021.

Проведены сравнительные исследования стойкости к различным видам изнашивания наноструктурированных покрытий Ti—Al—Ni—N и Ti—Al—Ni—Mo—N, характеризующихся однородной и многослойной архитектурой соответственно. Даны оценка влияния Mo и архитектуры покрытий на стойкостные характеристики к изнашиванию и эрозии исследованных керамикометаллических структур. Установлено, что для обоих покрытий не характерно разрушение по хрупкому механизму. Повышенная вязкость разрушения высокотвёрдых покрытий обоих составов определяется наличием пластичной металлической фазы, разветвлённой сетью границ нанозёрен (Ti—Al—Ni—N) и многослойной архитектурой (Ti—Al—Ni—N—Mo), подавляющих рост трещин. Оба покрытия показали высокую стойкость к гидроэроздионному изнашиванию. Присутствие молибден в составе покрытия Ti—Al—Ni—Mo—N обеспечивает снижение коэффициента трения скольжения при повышенных температурах, вследствие образования оксидной фазы ( $\text{MoO}_3$ ), выступающей в качестве твёрдой смазки.

**Ключевые слова:** износостойкие покрытия, наноструктурирование, адгезионное и когезионное разрушение, склерометрия, трибология, твёрдость покрытий, вязкость разрушения, гидроабразивная эрозия.

DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-2-136-144

---

*Адрес для переписки:*

Д.С. Белов  
Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС»,  
Ленинский проспект, д. 4, г. Москва 119049, Россия  
e-mail: dm.blv@yandex.ru

*Address for correspondence:*

D.S. Belov  
National University of Science and Technology “MISiS”,  
Leninskiy prospect, 4, Moscow 119049, Russia.  
e-mail: dm.blv@yandex.ru

---

*Для цитирования:*

Д.С. Белов, В.С. Сергеевин, И.В. Блинков, Н.И. Смирнов,  
А.В. Черногор.  
Сравнение стойкости ионно-плазменных вакуумно-дуговых  
покрытий Ti—Al—Ni—N и Ti—Al—Ni—Mo—N к изнашиванию и  
эроздии.  
Трение и износ.  
2021. — Т. 42, № 2. — С. 136—144.  
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-2-136-144

*For citation:*

D.S. Belov, V.S. Sergeevin, I.V. Blinkov, N.I. Smirnov, and  
A.V. Chernogor.  
[Comparative Researches on Wear and Erosion Resistance of Ion-  
Plasma Vacuum-Arc Coatings Ti—Al—Ni—N and Ti—Al—Ni—Mo—N].  
*Trenie i Iznos*.  
2021, vol. 42, no. 2, pp. 136—144 (in Russian).  
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-2-136-144

# Comparative Researches on Wear and Erosion Resistance of Ion-Plasma Vacuum-Arc Coatings Ti—Al—Ni—N and Ti—Al—Ni—Mo—N

D.S. Belov<sup>1</sup>, V.S. Sergevnnin<sup>1</sup>, I.V. Blinkov<sup>1</sup>, N.I. Smirnov<sup>2</sup>, and A.V. Chernogor<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National University of Science and Technology “MISiS,  
Leninskiy prospect, 4, Moscow 119049, Russia.

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN),  
Malyy Khariton'yevskiy pereulok, 4, Moscow 101000, Russia.

Received 26.06.2020.

Revised 11.01.2021.

Accepted 11.01.2021.

## Abstract

Comparative studies of resistance to various types of wear of nanostructured coatings Ti—Al—Ni—N and Ti—Al—Ni—Mo—N, characterized by a homogeneous and multilayer architecture, respectively, were carried out. The impact of Mo and the architecture of coatings on the resistance characteristics to wear and erosion of the studied ceramic-metal structures is estimated. It was found that both coatings are not characterized by a brittle failure mechanism. The increased fracture toughness of highly hard coatings of both compositions is determined by the presence of a plastic metal phase, a branched network of nanograin boundaries (Ti—Al—Ni—N) and a multilayer architecture (Ti—Al—Ni—N—Mo), which suppress crack growth. Both coatings showed high resistance to water erosion wear. The presence of molybdenum in the composition of the Ti—Al—Ni—Mo—N coating provides a decrease in the sliding friction coefficient at elevated temperatures due to the formation of an oxide phase ( $\text{MoO}_3$ ), which acts as a solid lubricant.

**Keywords:** wear-resistant coatings, nanostructuring, adhesive and cohesive failure, measuring scratching, tribology, coating hardness, fracture toughness, waterjet erosion.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2021-42-2-136-144

---

### Адрес для переписки:

Д.С. Белов  
Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС»,  
Ленинский проспект, д. 4, г. Москва 119049, Россия  
e-mail: dm.blv@yandex.ru

### Address for correspondence:

D.S. Belov  
National University of Science and Technology “MISiS”,  
Leninskiy prospect, 4, Moscow 119049, Russia.  
e-mail: dm.blv@yandex.ru

---

### Для цитирования:

Д.С. Белов, В.С. Сергеевнин, И.В. Блинков, Н.И. Смирнов,  
А.В. Черногор.  
Сравнение стойкости ионно-плазменных вакуумно-дуговых  
покрытий Ti—Al—Ni—N и Ti—Al—Ni—Mo—N к изнашиванию и  
эррозии.  
Трение и износ.  
2021. — Т. 42. — С. 136—144.  
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-2-136-144

### For citation:

D.S. Belov, V.S. Sergevnnin, I.V. Blinkov, N.I. Smirnov, and  
A.V. Chernogor.  
[Comparative Researches on Wear and Erosion Resistance of Ion-  
Plasma Vacuum-Arc Coatings Ti—Al—Ni—N and Ti—Al—Ni—Mo—N].  
*Trenie i Iznos*.  
2021, vol. 42, no. 2, pp. 136—144 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2021-42-2-136-144

## Список использованных источников

1. Lockwood D.J. Nanostructured Coatings / Ed. by A. Cavaleiro and J.Th.M. De Hosson. — Springer Science and Business Media, LLC. — 2006
2. Посылкина О. И., Латушкина С. Д., Комаровская В. М. Фазовый состав, механические и трибологические свойства покрытий системы Ti—Al—N, осаждаемых вакуумно-дуговым методом // Трение и износ. — 2019 (40), № 3, 298—302
3. Мигранов М. Ш., Мигранов А. М., Минигалеев С. М., Шехтман С. Р. Трибологические свойства многослойных покрытий для режущего инструмента // Трение и износ. — 2018 (39), № 3, 304—309
4. Блинков И.В., Волхонский А.О., Белов Д.С., Табачкова Н.Ю., Воронова М.И., Сорокин М.Н., Андреев В.А. Свойстваnanoструктурных керамико-металлических покрытий TiN-Ni, полученных ионно-плазменным вакуумно-дуговым методом // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2014, № 2, 43—50
5. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Belov D.S., Tabachkova N.Y., Andreev M.I., and Sorokin M.N. Structurization and Phase Formation in the Course of Preparing Nanocomposite TiN-Ni Ion-Plasma Vacuum-Arc Coatings and Their Thermal Stability // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. — 2015 (56), no. 5, 586—592
6. Gutkin M.Yu. and Ovid'ko I.A. Disclinations, Amorphization and Microcrack Generation at Grain Boundary Junctions in Polycrystalline Solids // Philosophical Magazine A. — 1994 (70), no. 4, 561—575
7. Hultman L. Thermal Stability of Nitride Thin Films // Vacuum. — 2000 (57), no. 1, 1—30
8. Sergevnin V.S., Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Belov D.S., Kuznetsov D.V., Gorshenkov M.V., and Skryleva E.A. / Wear behaviour of Wear-Resistant Adaptive Nano-Multilayered Ti-Al-Mo-N Coatings // Applied Surface Science. — 2016 (388), 13—23
9. Belov D.S., Blinkov I.V., and Volkhonskii A.O. The Effect of Cu and Ni on the Nanostructure and Properties of Arc-PVD Coatings Based in Titanium Nitride // Surface and Coatings Technology. — 2014 (260), 186—197
10. Blinkov I.V., Belov D.S., Volkhonskii A.O., Blinkov V.I., and Shatalov R.L. Structure of Nanocrystalline Arc-PVD (Ti,Al)N Coatings Modified with Nickel // Russian metallurgy (Metally). — 2015, № 5, 421—427
11. Сергеевнин В.С., Блинков И.В., Волхонский А.О., Белов Д.С. Влияние никеля на структуру и свойства аддитивных износостой-  
ких Arc-PVD покрытий Ti-Al-Mo-N // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2019, № 4, 68—77
12. Нефедов В.И. Рентгеноэлектронная спектроскопия химических соединений: Справочник. — М.: Химия. — 1984

## References

1. Lockwood D.J. Nanostructured Coatings / Ed. by A. Cavaleiro and J.Th.M. De Hosson. — Springer Science and Business Media, LLC. — 2006
2. Posylkina O.I., Latushkina S.D., and Komarovskaya V.M. Phase Composition, Mechanical and Tribological Properties of Ti—Al—N System Coatings Deposited by Vacuum-Arc Method // Journal of Friction and Wear. — 2019 (40), no. 3, 234—238
3. Migranov M.Sh., Migranov A.M., Minigaleev S.M., and Shehtman S.R. Tribological Properties of Multilayer Coatings for Cutting Tool // Journal of Friction and Wear. — 2018 (39), no. 3, 245—250
4. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Belov D.S., Tabachkova N.Y., Voronova M.I., Sorokin M.N., Andreev V.A. Svoystva nanostrukturnykh keramiko-metallicheskikh pokrytiy TiN-Ni, poluchennykh ionno-plazmennym vakuumno-dugovym metodom // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nyye pokrytiya. — 2014, № 2, 43—50 (in Russian)
5. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Belov D.S., Tabachkova N.Y., Andreev M.I., and Sorokin M.N. Structurization and Phase Formation in the Course of Preparing Nanocomposite TiN-Ni Ion-Plasma Vacuum-Arc Coatings and Their Thermal Stability // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. — 2015 (56), no. 5, 586—592
6. Gutkin M.Yu. and Ovid'ko I.A. Disclinations, Amorphization and Microcrack Generation at Grain Boundary Junctions in Polycrystalline Solids // Philosophical Magazine A. — 1994 (70), no. 4, 561—575
7. Hultman L. Thermal Stability of Nitride Thin Films // Vacuum. — 2000 (57), no. 1, 1—30
8. Sergevnin V.S., Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Belov D.S., Kuznetsov D.V., Gorshenkov M.V., and Skryleva E.A. / Wear behaviour of Wear-Resistant Adaptive Nano-Multilayered Ti-Al-Mo-N Coatings // Applied Surface Science. — 2016 (388), 13—23
9. Belov D.S., Blinkov I.V., and Volkhonskii A.O. The Effect of Cu and Ni on the Nanostructure and Properties of Arc-PVD Coatings Based in Titanium Nitride // Surface and Coatings Technology. — 2014 (260), 186—197
10. Blinkov I.V., Belov D.S., Volkhonskii A.O.,

- Blinkov V.I., and Shatalov R.L.** Structure of Nanocrystalline Arc-PVD (Ti,Al)N Coatings Modified with Nickel // Russian metallurgy (Metally). — 2015, № 5, 421—427
11. **Sergevnin V.S., Blinkov I.V., Volkonskii A.O., Belov D.S.** Vliyaniye nikelya na strukturu i svoystva adaptivnykh iznosostoykikh Arc-PVD pokrytiy Ti-Al-Mo-N // Izvestiya vysshikh ucheb-
- nykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nyye pokrytiya. — 2019, № 4, 68—77
12. **Nefedov V.I.** Rentgenoelektronnaya spektroskopiya khimicheskikh soyedineniy: Spravochnik. — M.: Khimiya. — 1984

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.  
Адрес редакции: 246050, ул.Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11  
*Full text of articles can be purchased from the editorial office.*  
*Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050 Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11*  
E-mail: [FWJ@tut.by](mailto:FWJ@tut.by)  
Web: <https://mpri.org.by/izdaniya/trenie-i-iznos/>