

УДК 621.785.532:539.234

# Инженерия поверхностей материалов триботехнического назначения с использованием концентрированных потоков заряженных частиц: современные подходы и перспективы

А.В. Белый

Белорусский национальный технический университет,  
проспект Независимости 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 12.09.2022.

После доработки 12.12.2022.

Принята к публикации 15.12.2022.

Одним из приоритетных направлений развития физического материаловедения в настоящее время является решение широкого круга научных и прикладных проблем инженерии поверхностей машиностроительных материалов. В работе рассмотрено современное состояние исследований и разработок в области инженерии поверхностей триботехнических материалов с использованием пучков заряженных частиц и плазменных потоков. Основное внимание уделено ионно-лучевой обработке, обработке с использованием вакуумно-дугового осаждения, использованию магнетронных распылительных систем, а также гибридным технологиям ионно-ассистированного осаждения покрытий. Кратко рассмотрены физические основы перечисленных методов инженерии поверхностей, приведён их сопоставительный анализ, определены наиболее актуальные области применения и перспективы развития. К настоящему времени накоплен огромный эмпирический материал, как в области технологических способов инженерии поверхностей обработки, так и в области материаловедения тонких поверхностных слоёв. При этом ощущается существенный недостаток фундаментальных представлений в понимании физико-химических механизмов, ответственных за изменение структуры и свойств поверхностей, что неизбежно приводит к распылению усилий исследователей и разработчиков.

**Ключевые слова:** инженерия поверхности, триботехнические материалы, ионная имплантация, вакуумное дуговое осаждение, магнетронное распыление, ионно-ассистированное осаждение.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-548-564

---

**Адрес для переписки:**

А.В. Белый  
Белорусский национальный технический университет,  
проспект Независимости 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: vmo@tut.by

---

**Address for correspondence:**

A.V. Byeli  
Belarusian National Technical University,  
Prospect Nezavisimosti, 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: vmo@tut.by

---

**Для цитирования:**

А.В. Белый.  
Инженерия поверхностей материалов триботехнического назначения с использованием концентрированных потоков заряженных частиц: современные подходы и перспективы. Трение и износ. 2022. — Т. 43, № 6. — С. 548—564.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-548-564

---

**For citation:**

A.V. Byeli.  
[Surface Engineering of Tribomaterials with Concentrated Beams of Charged Particles: Contemporary State of Art and Prospects].  
*Trenie i Iznos*.  
2022, vol. 43, no. 6, pp. 548—564 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-548-564

# Surface Engineering of Tribomaterials with Concentrated Beams of Charged Particles: Contemporary State of Art and Prospects

A.V. Byeli

Belarusian National Technical University,  
Prospekt Nezavisimosti, 65, Minsk 220013, Belarus

Received 12.09.2022.

Revised 12.12.2022.

Accepted 15.12.2022.

## Abstract

Modern state of the art in surface engineering of tribomaterials by beams of charged particle and plasma is presented. A number of techniques including ion beam processing, vacuum arc deposition, magnetron sputtering, and ion beam assisted deposition, including their comparative analysis are presented in the review. The basic attention is given to ion-beam treatment, vacuum-arc deposition with magnetron sputtering. Physical principles of the surface engineering techniques are considered and the most promising areas of development are analyzed with the prospects of their applications. To date, a huge amount of empirical material has been accumulated, both in the field of technological methods of surfaces treatment and in the field of materials science of thin surface layers. At the same time, there is a dramatic lack of fundamental ideas in understanding the physicochemical mechanisms responsible for surface structure modification and properties, which inevitably leads to a dispersion of the efforts of researchers and developers.

**Keywords:** surface engineering, tribomaterials, ion implantation, vacuum-arc deposition, magnetron sputtering, ion- beam assisted deposition.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-548-564

---

### Адрес для переписки:

А.В. Белый  
Белорусский национальный технический университет,  
проспект Независимости 65, г. Минск 220013, Беларусь  
e-mail: vmo@tut.by

### Для цитирования:

А.В. Белый.  
Инженерия поверхностей материалов триботехнического назначения с использованием концентрированных потоков заряженных частиц: современные подходы и перспективы. Трение и износ. 2022. — Т. 43, № 6. — С. 548—564.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-548-564

---

### Address for correspondence:

A.V. Byeli  
Belarusian National Technical University,  
Prospekt Nezavisimosti, 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: vmo@tut.by

### For citation:

A.V. Byeli.  
[Surface Engineering of Tribomaterials with Concentrated Beams of Charged Particles: Contemporary State of Art and Prospects].  
*Trenie i Iznos*. 2022, vol. 43, no. 6, pp. 548—564 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-6-548-564

## Список использованных источников

1. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. — М.: Машиностроение. — 1991
2. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. — М.: Наука. — 1983
3. Zharin A.L. Scanning Probe Microscopy in Nanoscale and Nanotechnology / ed. by Bharat Bhushan Technology Ed. — Dordrecht, London, New York: Springer Heidelberg. — 2010
4. Rigney D.F. Some Thoughts on Sliding Wear // Wear. — 1992 (152), 187—192
5. Трибология. Исследования и приложения: Опыт США и стран СНГ / под ред. В. А. Белого, К. Лудемы, Н. К. Мышкина. — М.: Машиностроение. — 1993
6. Панин В.Е. Физическая мезомеханика поверхностных слоев твердых тел // Физ. мезомех. — 1999 (2), № 6, 5—23
7. Sánchez-López J.C. and Fernández A. Doping and alloying effects on DLC coatings // Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Fundamentals and Applications / eds. by C. Donnet and A. Erdemir. — N.Y.: Springer. — 2008, 311—338
8. Жарин А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. — Минск: Бестпринт. — 1996
9. Gehlen P.C., Beeler J.R., Jr., and Jaffee R.I. Interatomic Potentials and Simulation of Lattice Defects. — New York. — 1972
10. Averbach R.S., Chaly M. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. — 1994 (B90), 191
11. Sasajima Y., Suzuki K., Ozawa S., and Yamamoto R. // Molecular Simulation. — 1991 (6), 333
12. Fedotov S.A., Efimchik A.A., and Byeli A.V. // Diamond and Related Materials. — 1997 (6), 1638—1645
13. Byeli A.V. and Fedotov S.A. // Surface Engineering. — 1994 (10), 136—144
14. Biersack J.P., Kruger W., and Stuller R.L. // Radiation Effects Letters. — 1985 (85), 193—201
15. Thorton J.A., Hoffman D.W. // J. Vac. Sci. Technol. — 1985 (A3), 76
16. Белый А.В., Карпович А.Н., Жарин А.Л., Тявловский А.К. Работа выхода электрона и физико-механические свойства хромсодержащих ионно-легированных сталей // Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. — 2016, № 1, 21—27
17. Белый А.В., Калинин А.С., Девойно О.Г., Кукареко В.А. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий. — Минск: Беларуская навука. — 2017
18. Колубаев А.В., Белый А.В., Буяновский И.А. и др. Механизмы деформирования и разрушения твердых покрытий в условиях фрикционного взаимодействия // Физика. — 2019 (62), № 8, 53—75
19. Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. — М. — 1991
20. Burenkov A.F., Komarov F.F., Fedotov S.A. // Nucl. Instr. Meth. — 1992. — Vol. B67. — P. 35,
21. Shakreev Yu., Kozlov E.V., Didenko A.N. et al. // Surf. Coat. Technol. — 1996 (83), 15
22. Комаров Ф.Ф., Константинов С.В., Погребняк Ф.Д. Влияние высокофокусного ионного облучения на структуру и механические свойства покрытий из наноструктурированных нитридов высокоэнтропийных сплавов (Ti, Hf, Zr, V, Nb) // Доклады НАН Беларуси. — 2015 (59), 24—30
23. Wilbur P.J. and Buchholz B.W. // Surf. Coat. Technol. — 1996 (79), 1—8
24. Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. — Мн.: Технопринт. — 2004
25. Григорчик А.Н., Кукареко В.А., Белый А.В. и др. Закономерности диффузии азота в процессе ионно-лучевого азотирования газотермического покрытия из аустенитной стали 06X19H9T // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016, № 2, 75—80
26. Григорчик А.Н. Особенности диффузионного переноса легирующей примеси при ионном азотировании газотермических покрытий // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016, № 1(34), 75—80
27. Byeli A., Ovcharenko V.E., Ivanov A.V., Mohovikov A.A., Ivanov K.V., Solonenko O.P., Uliantskiy V.U., Bao Hai Yu, and Zhang Honwei. Wear Resistance of the Surface Layers of Hard Alloys with a Multilevel Structural Phase State // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2016 (10), no. 4, 712—717
28. Белый А.В., Овчаренко В.Е., Иванов Ю.Ф., Иванов К.В., Моховиков А.А., Baohai Yu., Карпович А.Н. Электронно-ионно-плазменная модификация и упрочнение поверхностных слоев твердых сплавов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. — Минск: ФТИ НАН Беларуси. — 2016, 201—207
29. Витязь П.А., Панин В.Е., Белый А.В., Колубаев А.В. Механика пластической деформации и разрушения поверхностно упрочненных твердых тел в условиях трения // Физич. мезомех. — 2002 (5), № 1, 15—28
30. Ovcharenko V.E., Ivanov K.V., Mohovikov A.A., et al. // J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2016 (10), no. 4, 712—717
31. Psakhie S.G., Ovcharenko V.E., and Byeli A.V. // J. Mater. Sci. Technol. — 2013 (29), no. 11, 1036—1044
32. Горельчик А.Н., Чекан Н.М., Акула И.П. и др.

- Влияние ионно-лучевого азотирования стали X12M на адгезию и механические свойства покрытия нитрида хрома // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов. Кн. 1 Новые технологии и материалы. — Минск: ФТИ НАН Беларуси. — 2021, 235—249
33. **Латушкина С.Д., Посылкина О.И.** Особенности структурообразования и защитных свойств многокомпонентных покрытий, осаждаемых из плазмы вакуумно-дугового разряда // Актуальные проблемы прочности. — Витебск: ВГТУ. — 2018 (1), Гл. 4, 63—85
  34. **Злоцкий С.В.** Структура и механические свойства титан – хром-нитридных градиентных покрытий, полученных вакуумно-дуговым осаждением: Автореф. ... канд. физ.-мат. наук. — Минск. — 2016
  35. **Барковская М.М.** Структура и свойства покрытий, сформированных вакуумно-дуговым осаждением при совмещении потоков титана и хрома в среде азота: Автореф. ... канд. физ.-мат. наук. — Минск. — 2016
  36. **Юров В.М., Гученко С.А., Маханов К.М.** Структурные свойства высоко энтропийного покрытия TiNiZrCuCr // Современные наукоемкие технологии. — 2020, № 4-1, 78—83
  37. **Murty B.S., Yeh Jien-Wei, and Ranganathan S.** High Entropy Alloys. — Butterworth-Heinemann Ltd. (Verlag). — 2014
  38. **Chen T.K., Wong M.S., Shun T.T., and Yeh J.W.** Nanostructured Nitride Films of Multi-Element High-Entropy Alloys by Reactive DC Sputtering // Surf. Coat. Technol. — 2005 (200), no. 5–6, 1361—1365
  39. **Фирстов С.А., Андреев А.А., Горбань В.Ф., Даниленко Н.И., Крапивка Н.А., Столбовой В.А.** Новый класс сверхтвердых нитридных покрытий на основе многокомпонентных высокоэнтропийных сплавов // Сб. тр. Международной конференции “Нанотехнологии функциональных материалов”, г. Санкт-Петербург, 27–29 июня 2012 г. — 2012, 572—577
  40. **Chang Sh.-Yi, Lin Sh.-Y., Huang Yi-Ch., and Wu Ch.-L.** Mechanical Properties Deformation behaviors and Interface Adhesion of (AlCeTaTiCr)Nx Multi-Component Coatings // Surf. Coat. Technol. — 2010 (204), no. 20, 3307—3314
  41. **Tsai D.-Ch., Shieu F.-Sh., Chang Sh.-Y., Yao H.-Ch., and Deng M.-J.** Structures and Characterizations of TiVCr and TiVCrZrY Films Deposited by Magnetron Sputtering under Different Bias Powers // J. Electrochem. Soc. — 2010 (157), no. 3, K52—K58
  42. **Lai Ch.-H., Lin S.-J., Yen L.-W., and Chang Sh.-Y.** Preparation and Characterization of AlCrTaTiZr Multi-Element Nitride Coatings // Surf. Coat. Technol. — 2006 (201), no. 6, 3275—3285
  43. **Latushkina S., Kuis D., Posylkina O., Kasperovich A., and Panin E.** Synthesis of Al–Ti–Fe–Cr–Ni–N Coatings by the Method of Vacuum-Arc Deposition from a Separated Vacuum Flow // Materials Letters. — 2021 (303)
  44. **Lotkov A., Latushkina S., Kopylov V., et al.** Nanostructured Coatings (Ti, Zr)N as a Barrier to Hydrogen Diffusion into TiO.Pd (wt.%) Alloys // Metals. — 2021, no. 11, 1332—1337
  45. **Wang H.T., Xu Y.X., and Chen L.** Optimization of Cr-Al-N Coating by Multilayer Architecture with Ti-SiN Insertion Layer // J. Alloy. Compd. — 2017 (728), 952—958
  46. **Barshilia H.C., Prakash M.S., Jain A., and Rajam K.S.** Structure, Hardness and Thermal Stability of TiAlN and Nanolayered TiAlN/CrN Multilayer Films // Vacuum. — 2005 (77), no. 2, 169—179
  47. **Lomello F., Arab Pour Yazdi M., Sanchette P., Schuster F., Tabarant M., and Billard A.** Temperature Dependence of the Residual Stresses and Mechanical Properties in TiN/CrN Nanolayered Coating Processed by Cathodic Arc Deposition // Surf. Coat. Technol. — 2014 (238), 216—222
  48. **Колубаев А.В., Сизова О.В., Денисова Ю.А. и др.** Структура и свойства многослойных покрытий CrN/TiN на меди и медно-бериллиевом сплаве, нанесенных методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осаждения // Физическая мезомеханика. — 2022 (25), № 2, 35—46
  49. **Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии /** под ред. А.П. Гусенкова. — М.: Наука. — 1992
  50. **Григорьев С.Н., Воронин Н.А.** Технология вакуумно-плазменной обработки инструмента и деталей машин. — М.: МГТУ «СТАНКИН». — 2006
  51. **Хрущов М.М.** Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин / под ред. Г.В. Москвитина. — М.: УРСС/ЛЕНАНД. — 2013, 78—113
  52. **Klages C.P. and Memming R.** // Mat. Sci. Forum. — 1990 (52–53), 609—644
  53. **Jansson U. and Lewin E.** // Thin Solid Films. — 2013 (536), 1—24
  54. **Tribology of Diamond-Like Films. Fundamentals and Applications /** eds. C. Donnet and A. Erdemir. — N.Y.: Springer. — 2008
  55. **Manish Roy, Saha A., and Valleti K.** Microstructure and Wear of Cathodic Arc Physical Vapour Deposited on TiAlN, n-CrN and n-TiAlN/ $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Films // Defence Science Journal. — 2020 (70), no. 6, 656—663
  56. **Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н.** Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // Металлы. — 2007, № 5, 23—34
  57. **Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Степанова С.В.** Ионно-плазменные

- жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36-ВИ // *МнТОМ*. — 2011, № 1, 34—40
58. Kelly P.J. and Arnell R.D. // *Vacuum*. — 2000, no. 56, 159
59. Голосов Д.А., Сवादковский И.В., Завадский С.М. Ионно-ассистированное магнетронное распыление // *Электронная обработка материалов*. — 2002, № 6, 66
60. Svadkovski I.V., Dostanko A.P., Golosov D.A., and Zavatskiy S.M. // III Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology. — Minsk: Belarus. — 2000, № 2, 716
61. Svadkovski I.V., Golosov D.A., and Zavatskiy S.M. // NEET' 2001 II Int. Symp. — 2001. — Kazimierz Dolny, Poland. — 2001, 217
62. Golosov D.A., Svadkovski I.V., and Zavatski S.M. // 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flow. — Tomsk: Russia. — 2002, 148
63. Svadkovski I.V., Golosov D.A., and Zavatskiy S.M. // *Vacuum*. — 2002, no. 68, 283
64. Голосов Д.А., Сवादковский И.В., Завадский С.М. Ионно-ассистированное магнетронное распыление // 7-я международная конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом», 26–28 сентября 2007 г., Минск, Беларусь, 7<sup>th</sup> Int. Conf. «Interaction of Radiation with Solids», September 26–28, 2007, Minsk, Belarus. — 2007, 356—359
65. Щелканов И.А. Сильноточный импульсный магнетронный разряд с автоускорением плазмы: дис. ... канд. физ.-мат. наук / МИФИ. — Москва. — 2011
66. Белый А.В. // *Поверхность. Физика, химия, механика*. — 1989, № 10, 128—135
67. Byeli A.V., Colligon J., and Kheyrandish H. // *Thin Solid Films*. — 1991 (200), 283—291
- (2), № 6, 5—23 (in Russian)
7. Sánchez-López J.C. and Fernández A. Doping and alloying effects on DLC coatings // *Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Fundamentals and Applications* / eds. by C. Donnet and A. Erdemir. — N.Y.: Springer. — 2008, 311—338
8. Zharin A.L. Metod kontaktnoj raznosti potencialov i ego primenenie v tribologii. — Minsk: Bestprint. — 1996 (in Russian)
9. Gehlen P.C., Beeler J.R., Jr., and Jaffee R.I. Interatomic Potentials and Simulation of Lattice Defects. — New York. — 1972
10. Averbach R.S., Chaly M. // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* — 1994 (B90), 191
11. Sasajima Y., Suzuki K., Ozawa S., and Yamamoto R. // *Molecular Simulation*. — 1991 (6), 333
12. Fedotov S.A., Efimchik A.A., and Byeli A.V. // *Diamond and Related Materials*. — 1997 (6), 1638—1645
13. Byeli A.V. and Fedotov S.A. // *Surface Engineering*. — 1994 (10), 136—144
14. Biersack J.P., Kruger W., and Stuller R.L. // *Radiation Effects Letters*. — 1985 (85), 193—201
15. Thorton J.A., Hoffman D.W. // *J. Vac. Sci. Technol.* — 1985 (A3), 76
16. Byeli A.V., Karpovich A.N., Zharin A.L., Tyavlovskij A.K. Rabota vyhoda elektrona i fiziko-mekhanicheskie svoystva hromsoderzhashchih ionnolegirovannyh stalej // *Vesci NAN Belarusi. Seryya fiziko-tekhnicheskich navuk*. — 2016, № 1, 21—27 (in Russian)
17. Byeli A.V., Kalinichenko A.S., Devojno O.G., Kukareko V.A. Inzheneriya poverhnostej konstrukcionnyh materialov s ispol'zovaniem plazmenykh i puchkovykh tekhnologij. — Minsk: Belaruskaya navuka. — 2017 (in Russian)
18. Kolubaev A.V., Byeli A.V., Buyanovskij I.A. i dr. Mekhanizmy deformirovaniya i razrusheniya tverdykh pokrytij v usloviyah frikcionnogo vzaimodejstviya // *Fizika*. — 2019 (62), № 8, 53—75 (in Russian)
19. Komarov F.F. Ionnaya implantaciya v metally. — M. — 1991 (in Russian)
20. Burenkov A.F., Komarov F.F., Fedotov S.A. // *Nucl. Instr. Meth.* — 1992 (B67), 35
21. Shakreev Yu., Kozlov E.V., Didenko A.N. et al. // *Surf. Coat. Technol.* — 1996 (83), 15
22. Komarov F.F., Konstantinov S.V., Pogrebnyak F.D. Vliyanie vysokoflyuensnogo ionnogo oblucheniya na strukturu i mekhanicheskie svoystva pokrytij iz nanostrukturirovannyh nitridov vysokoentropijnyh splavov (Ti, Hf, Zr, V, Nb) // *Doklady NAN Belarusi*. — 2015 (59), 24—30 (in Russian)
23. Wilbur P.J. and Buchholtz B.W. // *Surf. Coat. Technol.* — 1996 (79), 1—8
24. Belocerkovskij M.A. Tekhnologii aktivirovannogo gazoplamennogo napyleniya antifrikcionnyh pokrytij. — Mn.: Tekhnoprint. — 2004 (in Russian)
25. Grigorichik A.N., Kukareko V.A., Byeli A.V. i dr. Zakonomernosti diffuzii azota v processe ionno-luchevogo azotirovaniya gazotermicheskogo pokrytiya

## References

1. Byeli A.V., Karpenko G.D., Myshkin N.K. *Struktura i metody formirovaniya iznosostojkikh poverhnostnykh sloev*. — M.: Mashinostroenie. — 1991 (in Russian)
2. Alekhin V.P. *Fizika prochnosti i plastichnosti poverhnostnykh sloev materialov*. — M.: Nauka. — 1983 (in Russian)
3. Zharin A.L. *Scanning Probe Microscopy in Nanoscale and Nanotechnology* / ed. by Bharat Bhushan Technology Ed. — Dordrecht, London, New York: Springer Heidelberg. — 2010
4. Rigney D.F. Some Thoughts on Sliding Wear // *Wear*. — 1992 (152), 187—192
5. *Tribologiya issledovaniya i prilozheniya: Opyt USA i stran SNG* / pod red. V. A. Belogo, K. Ludemy, N.K. Myshkina. — M.: Mashinostroenie, 1993 (in Russian)
6. Panin V.E. *Fizicheskaya mezomekhanika poverhnostnykh sloev tverdykh tel* // *Fiz. mezomekh.* — 1999

- iz austenitnoj stali 06H19N9T // *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov.* — 2016, № 2, 75—80 (in Russian)
26. **Grigorchik A.N.** Osobennosti diffuzionnogo perenosa legiruyushchej primesi pri ionnom azotirovanii gazotermicheskikh pokrytij // *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov.* — 2016, № 1(34), 75—80 (in Russian)
27. **Byeli A., Ovcharenko V.E., Ivanov A.V., Mohovikov A.A., Ivanov K.V., Solonenko O.P., Uliantskiy V.U., Bao Hai Yu, and Zhang Honwei.** Wear Resistance of the Surface Layers of Hard Alloys with a Multilevel Structural Phase State // *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* — 2016 (10), no. 4, 712—717
28. **Byeli A.V., Ovcharenko V.E., Ivanov YU.F., Ivanov K.V., Mohovikov A.A., Baohai Yu., Karpovich A.N.** Elektronno-ionno-plazmennaya modifikatsiya i uprochnenie poverhnostnykh sloev tverdykh splavov // *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Sb. nauchnykh trudov. V 3 kn. Kn. 2. Tekhnologii i oborudovanie mekhanicheskoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki.* — Minsk: FTI NAN Belarusi. — 2016, 201—207 (in Russian)
29. **Vityaz' P.A., Panin V.E., Byeli A.V., Koluiev A.V.** Mekhanika plasticheskoy deformatsii i razrusheniya poverhnostno uprochnennykh tverdykh tel v usloviyah treniya // *Fizich. mezomekh.* — 2002 (5), № 1, 15—28 (in Russian)
30. **Ovcharenko V.E., Ivanov K.V., Mohovikov A. A., et al.** // *J. Surf. Invest. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* — 2016 (10), no. 4, 712—717
31. **Psakhie S.G., Ovcharenko V.E., and Byeli A.V.** // *J. Mater. Sci. Technol.* — 2013 (29), no. 11, 1036—1044
32. **Gorel'chik A.N., Chekan N.M., Akula I.P. i dr.** Vliyanie ionno-luchevogo azotirovaniya stali H12M na adgeziyu i mekhanicheskie svoystva pokrytiya nitrida hroma // *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sb. nauchnykh trudov. Kn. 1 Novye tekhnologii i materialy.* — Minsk: FTI NAN Belarusi. — 2021, 235—249 (in Russian)
33. **Latushkina S.D., Posylkina O.I.** Osobennosti strukturoobrazovaniya i zashchitnykh svoystv mnogokomponentnykh pokrytij, osazhdaemykh iz plazmy vakuumno-dugovogo razryada // *Aktual'nye problemy prochnosti.* — Vitebsk: UO «VGTU». — 2018 (1), Gl. 4, 63—85 (in Russian)
34. **Zlockij S.V.** Struktura i mekhanicheskie svoystva titan – hrom - nitridnykh gradientnykh pokrytij, poluchennykh vakuumno-dugovym osazhdeniem: Avtoref. ... kand. fiz.-mat. nauk. — Minsk. — 2016 (in Russian)
35. **Barkovskaya M.M.** Struktura i svoystva pokrytij, sformirovannykh vakuumno-dugovym osazhdeniem pri sovmeshchenii potokov titana i hroma v srede azota: Avtoref. ... kand. fiz.-mat. nauk. — Minsk. — 2016 (in Russian)
36. **Yurov V.M., Guchenko S.A., Mahanov K.M.** Strukturnye svoystva vysoko entropijnogo pokrytiya TiNiZrCuCr // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii.* — 2020, № 4-1, 78—83 (in Russian)
37. **Murty B.S., Yeh Jien-Wei, and Ranganathan S.** High Entropy Alloys. — Butterworth-Heinemann Ltd. (Verlag). — 2014
38. **Chen T.K., Wong M.S., Shun T.T., and Yeh J.W.** Nanostructured Nitride Films of Multi-Element High-Entropy Alloys by Reactive DC Sputtering // *Surf. Coat. Technol.* — 2005 (200), no. 5–6, 1361—1365
39. **Firstov S.A., Andreev A.A., Gorban' V.F., Danilenko N.I., Krapivka N.A., Stolbovoj V.A.** Novyj klass sverhtverdykh nitridnykh pokrytij na osnove mnogokomponentnykh vysokoentropijnykh splavov // *Sb. tr. Mezhdunarodnoj konferencii "Nanotekhnologii funkcional'nykh materialov", g. Sankt-Peterburg, 27–29 iyunya 2012 g.* — 2012, 572—577 (in Russian)
40. **Chang Sh.-Yi, Lin Sh.-Y., Huang Yi-Ch., and Wu Ch.-L.** Mechanical Properties Deformation behaviors and Interface Adhesion of (AlCrTaTiCr)N<sub>x</sub> Multi-Component Coatings // *Surf. Coat. Technol.* — 2010 (204), no. 20, 3307—3314
41. **Tsai D.-Ch., Shieu F.-Sh., Chang Sh.-Y., Yao H.-Ch., and Deng M.-J.** Structures and Characterizations of TiVCr and TiVCrZrY Films Deposited by Magnetron Sputtering under Different Bias Powers // *J. Electrochem. Soc.* — 2010 (157), no. 3, K52—K58
42. **Lai Ch.-H., Lin S.-J., Yen L.-W., and Chang Sh.-Y.** Preparation and Characterization of AlCrTaTiZr Multi-Element Nitride Coatings // *Surf. Coat. Technol.* — 2006 (201), no. 6, 3275—3285
43. **Latushkina S., Kuis D., Posylkina O., Kasperovich A., and Panin E.** Synthesis of Al–Ti–Fe–Cr–Ni–N Coatings by the Method of Vacuum-Arc Deposition from a Separated Vacuum Flow // *Materials Letters.* — 2021 (303)
44. **Lotkov A., Latushkina S., Kopylov V., et al.** Nanostructured Coatings (Ti, Zr)N as a Barrier to Hydrogen Diffusion into TiO.Pd (wt.%) Alloys // *Metals.* — 2021, no. 11, 1332—1337
45. **Wang H.T., Xu Y.X., and Chen L.** Optimization of Cr-Al-N Coating by Multilayer Architecture with Ti-SiN Insertion Layer // *J. Alloy. Compd.* — 2017 (728), 952—958
46. **Barshilia H.C., Prakash M.S., Jain A., and Rajam K.S.** Structure, Hardness and Thermal Stability of TiAlN and Nanolayered TiAlN/CrN Multilayer Films // *Vacuum.* — 2005 (77), no. 2, 169—179
47. **Lomello F., Arab Pour Yazdi M., Sanchette P., Schuster F., Tabarant M., and Billard A.** Temperature Dependence of the Residual Stresses and Mechanical Properties in TiN/CrN Nanolayered Coating Processed by Cathodic Arc Deposition // *Surf. Coat. Technol.* — 2014 (238), 216—222
48. **Kolubaev A.V., Sizova O.V., Denisova Yu.A. i dr.**

- Структура и свойства многослойных покрытий CrN/TiN на меди и медно-бериллиевом сплаве, нанесенных методом вакуумно-дугового плазменно-ассистированного осажде­ния // *Fizicheskaya mezhmekhanika*. — 2022 (25), № 2, 35—46 (in Russian)
49. **Metody i sredstva uprochneniya poverhnostej detalej mashin koncentrirovannymi potokami energii** / pod red. A.P. Gusenkova. — M.: Nauka. — 1992 (in Russian)
50. **Grigor'ev S.N., Voronin N.A.** Tekhnologiya vakuumno-plazmennoj obrabotki instrumenta i detalej mashin. — M.: MGTU «STANKIN». — 2006 (in Russian)
51. **Hrushchov M.M.** Sovremennye tekhnologii modifitsirovaniya poverhnostej detalej mashin / pod red. G.V. Moskvitina. — M.: URSS/LENAND. — 2013, 78—113 (in Russian)
52. **Klages C.P. and Memming R.** // *Mat. Sci. Forum*. — 1990 (52–53), 609—644
53. **Jansson U. and Lewin E.** // *Thin Solid Films*. — 2013 (536), 1—24
54. **Tribology of Diamond-Like Films. Fundamentals and Applications** / eds. C. Donnet and A. Erdemir. — N.Y.: Springer. — 2008
55. **Manish Roy, Saha A., and Valleti K.** Microstructure and Wear of Cathodic Arc Physical Vapour Deposited on TiAlN, n-CrN and n-TiAlN/ $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Films // *Defence Science Journal*. — 2020 (70), no. 6, 656—663
56. **Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A., Budinovskij S.A., Lucenko A.N.** Ionno-plazmennye zashchitnye pokrytiya dlya lopatok gazoturbinnih dvigatelej // *Metally*. — 2007, № 5, 23—34 (in Russian)
57. **Budinovskij S.A., Muboyadzhyan S.A., Gayamov A.M., Stepanova S.V.** Ionno-plazmennye zharostojkie pokrytiya s kompozitsionnym bar'ernym sloem dlya zashchity ot okisleniya splava ZHS36-VI // *MiTOM*. — 2011, № 1, 34—40 (in Russian)
58. **Kelly P.J. and Arnell R.D.** // *Vacuum*. — 2000, no. 56, 159
59. **Golosov D.A., Svadkovskij I.V., Zavadskij S.M.** Ionno-assistirovannoe magnetronnoe raspylenie // *Elektronnaya obrabotka materialov*. — 2002, № 6, 66 (in Russian)
60. **Svadkovski I.V., Dostanko A.P., Golosov D.A., and Zavatskiy S.M.** // III Int. Conf. Plasma Physics and Plasma Technology. — Minsk: Belarus. — 2000, № 2, 716
61. **Svadkovski I.V., Golosov D.A., and Zavatskiy S.M.** // *NEET' 2001 II Int. Symp.* — 2001. — Kazimierz Dolny, Poland. — 2001, 217
62. **Golosov D.A., Svadkovski I.V., and Zavadski S.M.** // 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flow. — Tomsk: Russia. — 2002, 148
63. **Svadkovski I.V., Golosov D.A., and Zavatskiy S.M.** // *Vacuum*. — 2002, no. 68, 283
64. **Golosov D.A., Svadkovskij I.V., Zavadskij S.M.** Ionno-assistirovannoe magnetronnoe raspylenie // 7-ya mezhdunarodnaya konferenciya «Vzaimodejstvie izluchenij s tverdym telom», 26–28 sentyabrya 2007 g., Minsk, Belarus, 7<sup>th</sup> Int. Conf. «Interaction of Radiation with Solids», September 26–28, 2007, Minsk, Belarus. — 2007, 356—359 (in Russian)
65. **Schelkanov I.A.** Sil'notochnyj impul'snyj magnetronnyj razryad s avtouskoreniem plazmy: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk / MIFI. — Moskva. — 2011 (in Russian)
66. **Byeli A.V.** // *Poverhnost'. Fizika, himiya, mekhanika*. — 1989, № 10, 128—135 (in Russian)
67. **Byeli A.V., Colligon J., and Kheyrandish H.** // *Thin Solid Films*. — 1991 (200), 283—291

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)