

УДК 621.891:621.894:534.1

# Влияние обработки неравновесной низкотемпературной плазмой на динамические механические и триботехнические характеристики фрикционных полимерных композитов

С.Н. Бухаров<sup>1</sup>, А.Г. Анисович<sup>2</sup>, И.И. Филатова<sup>3</sup>, Т.А. Ахметов<sup>1</sup>, В.П. Сергиенко<sup>1</sup>,  
А.Я. Григорьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси,  
ул. Кирова, 32а, г. Гомель 246050, Беларусь

<sup>2</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси,  
ул. Купревича, 10, г. Минск 220141, Беларусь

<sup>3</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,  
пр. Независимости, 68, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила в редакцию 02.03.2021.

После доработки 12.03.2021.

Принята к публикации 12.03.2021.

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния неравновесной низкотемпературной плазмы на динамические механические характеристики, определяющие виброакустическую активность трибосопряжений, и триботехнические свойства фрикционных полимерных композиционных материалов с политетрафторэтиленовой матрицей. Целью исследования являлось установление влияния поверхностной обработки композитов низкотемпературной плазмой высокочастотного ёмкостного разряда в среде воздуха на их динамические механические характеристики и триботехнические свойства. Методами нерезонансного динамического механического анализа установлено, что обработка плазмой приводит к снижению значений тангенса механических потерь композитов в поверхностном слое во всем исследуемом диапазоне температур (293—473 К), при этом наблюдается смещение пиков тангенса, соответствующих  $\alpha$ - и  $\beta$ -переходам полимерной матрицы композита, в область более высоких температур. Значения динамического модуля упругости композита показали тенденцию к незначительному повышению, однако это увеличение находится на границе чувствительности метода. Обнаружено, что обработка плазмой фрикционных композитов приводит к стабилизации и увеличению коэффициента динамического трения, а также снижению скорости изнашивания.

**Ключевые слова:** фрикционные композиционные материалы, политетрафторэтилен, неравновесная низкотемпературная плазма, износстойкость, механические свойства, шум.

DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-3-225-234

---

Адрес для переписки:

С.Н. Бухаров  
Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого  
НАН Беларуси,  
ул. Кирова, 32а, г. Гомель 246050, Беларусь  
e-mail: sbuharov@tut.by

Address for correspondence:

S.N. Bukharov  
V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of  
Sciences of Belarus,  
Kirov street, 32a, Gomel 246050, Belarus  
e-mail: sbuharov@tut.by

Для цитирования:

С.Н. Бухаров, А.Г. Анисович, И.И. Филатова, Т.А. Ахметов,  
В.П. Сергиенко, А.Я. Григорьев.  
Влияние обработки неравновесной низкотемпературной плазмой  
на динамические механические и триботехнические  
характеристики фрикционных полимерных композитов.  
Трение и износ.  
2021. — Т. 42, № 3. — С. 225—234.  
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-3-225-234

For citation:

S.N. Bukharov, A.G. Anisovich, I.I. Filatova, T.A. Akhmetov,  
V.P. Sergienko, and A.Ya. Grigoriev.  
[Effect of non-Thermal Energy Treatments on Dynamic Mechanical  
and Tribotechnical Characteristics of Polymer Friction Composites.  
Part 1: Effect of Cold Air Plasma].  
*Trenie i Iznos*.  
2021, vol. 42, no. 3, pp. 225—234 (in Russian).  
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-3-225-234

# Influence of Treatments with Non-Equilibrium Low-Temperature Plasma on Dynamic Mechanical and Tribotechnical Characteristics of Friction Polymer Composites.

S.N. Bukharov, A.G. Anisovich, I.I. Filatova, T.A. Akhmetov, V.P. Sergienko, and A.Ya. Grigoriev

<sup>1</sup> V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus,  
Kirov street, 32a, Gomel 246050, Belarus

<sup>2</sup> Physical-Technical Institute of National Academy of Sciences of Belarus,  
Kupreevicha street, 10, Minsk 220141, Belarus

<sup>3</sup> B.I. Stepanov Institute of Physics of National Academy of Sciences of Belarus,  
Nezavisimosti Ave., 68, Minsk 220072, Belarus

Received 02.03.2021.

Revised 12.03.2021.

Accepted 12.03.2021.

## Abstract

The results of experimental studies of the influence of nonequilibrium low-temperature plasma on the tribotechnical properties of friction polymer composite materials with a polytetrafluoroethylene matrix, including the tendency of the material to cause self-oscillations and noise during friction, are presented. The aim of the study was to establish the effect of treatment with low-temperature plasma in air on dynamic mechanical characteristics, static and dynamic friction coefficients, and wear resistance of composites. Using non-resonant dynamic mechanical analysis method, it has been established that plasma treatment of composites leads to a decrease in the mechanical loss tangent over the entire temperature range studied (293—473 K), with a shift of the tangent peaks corresponding to the  $\alpha$  and  $\beta$  transitions of the composite polymer matrix to the region higher temperatures. It is shown that the tribotechnical effect of plasma treatment consists in a significant stabilization and increase in dynamic friction coefficients, as well as a decrease in the wear rate of composites. Thus, processing with a low temperature plasma may turn out to be a promising technology both for increasing the service life of friction products and for reducing brake groan.

**Keywords:** friction composite materials, polytetrafluoroethylene, nonequilibrium cold plasma, wear, dynamical mechanical properties, noise.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2021-42-3-225-234

---

### Адрес для переписки:

С.Н. Бухаров  
Институт механики металлокомпозитных систем им. В.А. Белого  
НАН Беларусь,  
ул. Кирова, 32а, г. Гомель 246050, Беларусь  
e-mail: sbuharov@tut.by

### Address for correspondence:

S.N. Bukharov  
V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of  
Sciences of Belarus,  
Kirov street, 32a, Gomel 246050, Belarus  
e-mail: sbuharov@tut.by

---

### Для цитирования:

С.Н. Бухаров, А.Г. Анисович, И.И. Филатова, Т.А. Ахметов,  
В.П. Сергиенко, А.Я. Григорьев.  
Влияние обработки неравновесной низкотемпературной плазмой  
на динамические механические и триботехнические  
характеристики трения и износа полимерных композитов.  
Трение и износ.  
2021. — Т. 42, № 3. — С. 225—234.  
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-3-225-234

### For citation:

S.N. Bukharov, A.G. Anisovich, I.I. Filatova, T.A. Akhmetov,  
V.P. Sergienko, and A.Ya. Grigoriev.  
[Effect of non-Thermal Energy Treatments on Dynamic Mechanical  
and Tribotechnical Characteristics of Polymer Friction Composites.  
Part 1: Effect of Cold Air Plasma].  
*Trenie i Iznos*.  
2021, vol. 42, no. 3, pp. 225—234 (in Russian).  
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-3-225-234

## Список использованных источников

1. Ажаронок В.В., Анисович А.Г., Басалай А.В., Гончарик С.В., Филатова И.И., Чубрик Н.И. Трансформация структуры меди под воздействием неравновесной низкотемпературной плазмы воздуха // Инженерно-физический журнал. — 2013 (86), № 4, 731—738
2. Zendehnam A., Ghasemi J., and Zendehnam A. Employing Cold Atmospheric Plasma (Ar, He) on Ag Thin Film and Their Influences on Surface Morphology and Anti-Bacterial Activity of Silver Films for Water Treatment // International Nano Letters. — 2018, no. 8, 157—164
3. Anisovich A.G., Azharonok V.V., Gologan V.F., and Bobanova Zh.I. The Effect of Low Temperature Nonequilibrium Air Plasma on the Structure and Properties of Copper and Chromium Electro-deposited Coatings // International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology. — 2016, no. 2, 42—49
4. Достанко А.П., Босяков М.Н., Кухарев С.А. Модификация поверхности твердых тел в неравновесной газоразрядной плазме. — Минск: Армита-маркетинг менеджмент. — 1996
5. Григорьев А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей. — Минск: Беларуская наука. — 2016
6. Горберг Б.Л., Иванов А.А., Мамонтов О.В., Стегнин В.А., Титов В.А. Модифицирование текстильных материалов нанесением нанопокрытий методом магнетронного ионно-плазменного распыления // Российский химический журнал. — 2011 (55), № 3, 7—13
7. Терешко И.В., Ходырев В.И., Липский Э.А. и др. Эффект дальнодействия в материалах при низкоэнергетическом ионном облучении // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. Сер. Физика твердого тела. — 1998, № 2, 131—139
8. Кудина Е.Ф., Бахин В.Ф. О повышении адгезионной прочности в волокнисто-армированных композиционных материалах // Материалы, технологии, инструменты. — 2011 (16), № 1, 98—101
9. Sergienko V.P. and Bukharov S.N. Noise and Vibration in Friction Systems. — Switzerland: Springer. — 2015
10. Sergienko V.P. and Bukharov S.N. Noise and Vibration in Frictional Joints of Machines // Tribologia. — 2008, no. 1, 129—137
11. Sergienko V.P. and Bukharov S.N. Formula and Structure Effect of Frictional Materials on Their Damping Properties and NVH Performance of Friction Joints // SAE Technical Paper No. 2009-01-3016. — Warrendale, PA: SAE Int. — 2009
12. Lewis T. Analysis and Control of Brake Noise // SAE Technical Paper No. 872240. Warrendale, PA: SAE Int. — Warrendale, PA: SAE Int. — 1987
13. Ghesquiere H. Brake Squeal Noise Analysis and Prediction // ImechE paper No. 925060. — 1992
14. Ahmed I. On the Analysis of Drum Brake Squeal Using Finite Element Methods Technique // SAE Technical Paper No. 2006-01-3467. — Warrendale, PA: SAE Int. — 2006
15. Ostermeyer G.P. On Tangential Friction Induced Vibrations in Brake Systems // SAE Technical Paper No. 2008-01-2850. — Warrendale, PA: SAE Int. — 2008
16. Sergienko V.P. and Bukharov S.N. Effect of Dynamic Mechanical Characteristics of the Frictional Materials on Friction-Induced Vibration and Noise of the Tribounits // Journal of Research and Development in Mechanical Industry (JRaDMI). — 2009 (1), no. 2, 190—195
17. Анисович А.Г., Урбан Т.П., Филатова И.И., Буйницкая А.С., Гончарик С.В. Изменение ориентировок текстуры электролитического никеля при обработке холодной плазмой воздуха // Литье и металлургия. — 2019, № 4, 107—114

## References

1. Azharonok V.V., Anisovich A.G., Basalay A.V., Goncharik S.V., Filatova I.I., Chubrik N.I. Transformatsiya struktury medi pod vozdeystviem neravnovesnoy nizkotemperaturnoy plazmy vozdukh [Copper Structure Transformation under the Influence of Nonequilibrium Low-Temperature Air Plasma] // Engineering Physics Journal. — 2013 (86), no. 4, 731—738
2. Zendehnam A., Ghasemi J., and Zendehnam A. Employing Cold Atmospheric Plasma (Ar, He) on Ag Thin Film and Their Influences on Surface Morphology and Anti-Bacterial Activity of Silver Films for Water Treatment // International Nano Letters. — 2018, no. 8, 157—164
3. Anisovich A.G., Azharonok V.V., Gologan V.F., and Bobanova Zh.I. The Effect of Low Temperature Nonequilibrium Air Plasma on the Structure and Properties of Copper and Chromium Electro-deposited Coatings // International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology. — 2016, no. 2, 42—49
4. Dostanko A.P., Bosyakov M.N., Kukharev S.A. Modifikatsiya poverhnosti tverdykh tel v neravnovesnoy gazorazryadnoy plazme [Surface Modification of Solids in a Nonequilibrium Gas-Discharge Plasma]. — Minsk: Armita-marketing menedzhment. — 1996
5. Grigoriev A.Ya. Fizika i mikrogeometriya tekhnicheskikh poverkhnostey [Physics and Microgeometry of Technical Surfaces]. — Minsk: Bielaruskaja navuka. — 2016
6. Gorberg B.L., Ivanov A.A., Mamontov O.V.,

- Stegnin V.A., Titov V.A.** Modifitsirovaniye tekstil'nykh materialov naneseniyem nanopokrytiy metodom magnetronnogo ionno-plazmennogo raspyleniya [Modification of Textile Materials by Applying Nanocoatings by Magnetron Ion-Plasma Sputtering] // Russian chemical journal. — 2011 (55), no. 3, 7—13
7. **Tereshko I.V., Khodyrev V.I., Lipsky E.A. et al.** Effekt dal'nodeystviya v materialakh pri nizkoenergeticheskem ionnom obluchenii [Long-Range Effect in Materials under Low-Energy Ion Irradiation] // Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky. Series Solid State Physics. — 1998, № 2, 131—139
8. **Kudina E.F., Bakhin V.F.** O povyshenii adgezionnoy prochnosti v voloknisto-armirovannykh kompozitsionnykh materialakh [On increasing the adhesion strength in fiber-reinforced composite materials] // Materials, technologies, tools. — 2011 (16), no. 1, 98—101
9. **Sergienko V.P. and Bukharov S.N.** Noise and Vibration in Friction Systems. — Switzerland: Springer. — 2015
10. **Sergienko V.P. and Bukharov S.N.** Noise and Vibration in Frictional Joints of Machines // Tribologiya. — 2008, no. 1, 129—137
11. **Sergienko V.P. and Bukharov S.N.** Formula and Structure Effect of Frictional Materials on Their Damping Properties and NVH Performance of Friction Joints // SAE Technical Paper No. 2009-01-3016. — Warrendale, PA: SAE Int. — 2009
12. **Lewis T.** Analysis and Control of Brake Noise // SAE Technical Paper No. 872240. Warrendale, PA: SAE Int. — Warrendale, PA: SAE Int. — 1987
13. **Ghesquiere H.** Brake Squeal Noise Analysis and Prediction // ImechE paper No. 925060. — 1992.
14. **Ahmed I.** On the Analysis of Drum Brake Squeal Using Finite Element Methods Technique // SAE Technical Paper No. 2006-01-3467. — Warrendale, PA: SAE Int. — 2006.
15. **Ostermeyer G.P.** On Tangential Friction Induced Vibrations in Brake Systems // SAE Technical Paper No. 2008-01-2850. — Warrendale, PA: SAE Int. — 2008
16. **Sergienko V.P. and Bukharov S.N.** Effect of Dynamic Mechanical Characteristics of the Frictional Materials on Friction-Induced Vibration and Noise of the Tribounits // Journal of Research and Development in Mechanical Industry (JRaDMI). — 2009 (1), no. 2, 190—195
17. **Anisovich A.G., Urban T.P., Filatova I.I., Buunitskaya A.S., Goncharik S.V.** Izmeneniye oriyentirovok tekstury elektroliticheskogo nikelya pri obrabotke kholodnoy plazmoy vozdukha [Change in Texture Orientations of Electrolytic Nickel Upon Treatment with Cold Air Plasma] // Casting and metallurgy. — 2019, no. 4, 107—114

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/>