

УДК 62-752.2:621.891:681.5.015.8+06

## Упруго-диссипативные характеристики тяжело-нагруженных модифицированных пар трения

С.Л. Чернышев<sup>1</sup>, В.И. Колесников<sup>2</sup>, В.Д. Верескун<sup>2</sup>, И.В. Колесников<sup>2</sup>, Д.С. Мантуров<sup>2</sup>, А.Л. Озябкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, ул. Жуковского, д. 1, г. Жуковский, Московская область 140180, Россия

<sup>2</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону 344038, Россия

Поступила в редакцию 15.11.2022.

После доработки 19.02.2023.

Принята к публикации 21.02.2023.

Представлены результаты исследований распределения элементов в покрытии CrAlSiN, их сравнительные физико-механические и трибологические характеристики. Показано, что модификация поверхности покрытием системы CrAlSiN позволяет повысить прочность и сопротивление пластической деформации, что обеспечивает качественное осаждение тонких вакуумных ионно-плазменных покрытий и повышение износостойкости. Для контроля рабочего состояния узлов трения с такими покрытиями требуются разработки технологии мониторинга с использованием безразмерного коэффициента демпфирования фрикционно-механических связей в долеоктавных диапазонах частот вынужденных колебаний, позволяющих выявить частоты собственных колебаний, на которых проявляются характеристики используемых покрытий и модификаторов трения антифрикционного или фрикционного назначения. Наблюдение за вариациями упруго-диссипативных и инерционных характеристик взаимодействия контактирующих поверхностей и анализ обобщённого динамического критерия на тяжело нагруженных узлах трения, работающих в режиме граничной смазки, позволили установить: для фрикционных подсистем — стабильность сцепления контактирующих тел трения, для антифрикционных подсистем — эффективность смазочных материалов, переход к граничному трению и трению без смазочного материала. Применение разработанных авторами технологий для тяжело нагруженных трибосистем позволяет увеличить износостойкость, надёжность и безопасность эксплуатации железнодорожного и воздушного видов транспорта.

**Ключевые слова:** вакуумное ионно-плазменное покрытие, физико-механические характеристики, трибологические характеристики, узел трения, диссипация энергии, безразмерный коэффициент демпфирования, мониторинг, критерии качества.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-1-58-67

---

**Адрес для переписки:**

В.И. Колесников  
Ростовский государственный университет путей сообщения,  
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2,  
г. Ростов-на-Дону 344038, Россия  
e-mail: kvi@rgups.ru

**Address for correspondence:**

V.I. Kolesnikov  
Rostov State Transport University,  
Rostovskogo Strelkovogo Narodnogo Opolcheniya Sq., 2,  
Rostov-on-Don 344038, Russia  
e-mail: kvi@rgups.ru

**Для цитирования:**

С.Л. Чернышев, В.И. Колесников, В.Д. Верескун, И.В. Колесников,  
Д.С. Мантуров, А.Л. Озябкин

Упруго-диссипативные характеристики тяжело-нагруженных  
модифицированных пар трения.

Трение и износ.

2023. — Т. 44, № 1. — С. 58–67.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-1-58-67

**For citation:**

S.L. Chernyshov, V.I. Kolesnikov, V.D. Vereskun, I.V. Kolesnikov,  
D.S. Manturov, and A.L. Ozyabkin  
[Elastic-Dissipative Properties of Heavy-Loaded Modified Friction  
Pairs].

*Trenie i Iznos.*

2023, vol. 44, no. 1, pp. 58–67 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-1-58-67

# Elastic-Dissipative Properties of Heavy-Loaded Modified Friction Pairs

S.L. Chernyshov<sup>1</sup>, V.I. Kolesnikov<sup>2</sup>, V.D. Vereskun<sup>2</sup>, I.V. Kolesnikov<sup>2</sup>, D.S. Manturov<sup>2</sup>, and A.L. Ozyabkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N.E. Zhukovsky, Zhukovsky Str., 1, Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russia

<sup>2</sup>Rostov State Transport University, Rostovskogo Strelkovogo Narodnogo Opolcheniya Sq., 2, Rostov-on-Don 344038, Russia

Received 15.11.2022.

Revised 19.02.2023.

Accepted 21.02.2023.

## Abstract

Attempts to solve these interrelated tasks by specifying materials for coating, and developing a methodology for monitoring the friction unit operation. The importance and originality of this study is that it examines the distribution of elements in the CrAlSiN coating, their comparative physical, mechanical and tribological properties. Besides, we have found that surface modification with a coating of the CrAlSiN system increases the strength and resistance to plastic deformation, which ensures high-quality deposition of thin vacuum ion-plasma coatings and leads to an increase in wear resistance. To control friction units with such coatings, it was decided to develop a monitoring technology using dimensionless damping coefficient of friction-mechanical bonds in sub-octave band frequency ranges of forced vibrations. It makes it possible to identify natural vibration frequencies, which manifest the properties of the coatings and modifiers used for friction or anti-friction purposes. Our findings should make a significant contribution to tribology. Alongside observations of variations in the elastic-dissipative and inertial properties of the interaction between contact surfaces, the analysis of the generalized dynamic criteria on heavily loaded friction units that operate in the boundary lubrication mode allowed determining adhesion stability of contact friction bodies for friction subsystems. Furthermore, we have defined the effectiveness of lubricants, transition to boundary friction and non-lubricated friction for antifriction subsystems. The use of the technologies developed by the authors for heavy-loaded tribosystems makes it possible to increase the wear resistance, reliability and safety of operation of railway and air transport modes.

**Keywords:** vacuum ion-plasma coating, physical and mechanical properties, tribological properties, friction unit, energy dissipation, dimensionless damping coefficient, monitoring, quality criteria.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-1-58-67

---

### Адрес для переписки:

В.И. Колесников  
Ростовский государственный университет путей сообщения,  
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2,  
г. Ростов-на-Дону 344038, Россия  
e-mail: kvi@rgups.ru

### Для цитирования:

С.Л. Чернышев, В.И. Колесников, В.Д. Верескун, И.В. Колесников,  
Д.С. Мантуров, А.Л. Озябкин

Упруго-диссипативные характеристики тяжело-нагруженных  
модифицированных пар трения.

Трение и износ.

2023. – Т. 44, № 1. – С. 58–67.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-1-58-67

---

### Address for correspondence:

V.I. Kolesnikov  
Rostov State Transport University,  
Rostovskogo Strelkovogo Narodnogo Opolcheniya Sq., 2,  
Rostov-on-Don 344038, Russia  
e-mail: kvi@rgups.ru

### For citation:

S.L. Chernyshov, V.I. Kolesnikov, V.D. Vereskun, I.V. Kolesnikov,  
D.S. Manturov, and A.L. Ozyabkin

[Elastic-Dissipative Properties of Heavy-Loaded Modified Friction  
Pairs].

*Trenie i Iznos.*

2023, vol. 44, no. 1, pp. 58–67 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-1-58-67

## Список использованных источников

1. **de Almeida E.A. dos S., Milan J.C.G., Costa H.L., Krelling A.P., and da Costa C.E.** Sliding Wear of Borided Sintered AISI M2 Steel Coated with Al-TiN/CrN Multilayer // *Wear*. — 2018 (**410-411**), 11—24. DOI:10.1016/j.wear.2018.05.025
2. **Шаповалов В.В., Сладковски А., Эркеннов А.Ч.** Актуальные задачи современной триботехники и пути их решения // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. — 2015 (**658**), 64—75
3. **Колесников В.И., Озябкин А.Л., Новиков Е.С.** Инновационный подход к изучению процессов трения, износа и мониторинга тяжело нагруженных трибосистем // *Трение и износ*. — 2019 (**40**), № 4, 380—388
4. **Roy M.** Nanocomposite Films for Wear Resistance Applications // in: Roy M. (ed) *Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear*. — Vienna: Springer. — 2013, 45—78
5. **Колесников И.В., Мотренко П.Д., Колесников В.И., Мантуров Д.С.** Повышение износостойкости металлических и металлополимерных трибосистем путём формирования структуры и свойств их поверхностного слоя. — М.: ВИНТИ РАН. — 2021
6. **Filonenko S. and Nimchenko T.** Sensitivity of an Acoustic Emission to Wearing of Surfaces of a Composite Material // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. — 2014 (**3**), no. 9, 35—41
7. **Байбуринов В.Б., Кузнецов В.А., Чернышев С.Л.** Методы моделирования диагностики твердотельных термоупругих структур // *Радиотехника*. — 2018, № 9, 65—68
8. **Dykha A., Matyukh S., and Kalaczyński T.** Diagnostics – Experimental Analysis of Friction Pairs at Stick // *Slip Sliding. MATEC Web of Conferences*. — 2019 (**302**), 01004
9. **Меделяев И.А.** Основы технологии повышения работоспособности узлов трения транспортной техники // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. — 2020, № 12, 547—551
10. **Builo S.I., Vereskun V.D., Kolesnikov V.I., Manturov D.S., and Popov O.N.** Determining Friction Coefficient at Run-In Stage and Diagnosing the Point of Transition to Steady-State Phase Based on Acoustic Emission Signals // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. — 2020 (**56**), 41—48
11. **Oliveira G.L., Costa C.A., Teixeira S.C.S., and Costa M.F.** The Use of Nano- and Micro-Instrumented Indentation Tests to Evaluate Viscoelastic behavior of Poly (Vinylidene Fluoride) (PVDF) // *Polymer Testing*. — 2014 (**34**), 10—16
12. **Díez-Pascual A.M., Gómez-Fatou M.A., Ania F., and Flores A.** Nanoindentation in Polymer Nanocomposites // *Progress in Materials Science*. — 2015 (**67**), 1—94
13. **Chuang S.-F., Lin S.-Y., Wei P.-J., Han C.-F., Lin J.-F., and Chang H.-C.** Characterization of the

- Elastic and Viscoelastic Properties of Dentin by a Nanoindentation Creep Test // *Journal of Biomechanics*. — 2015 (**48**), no. 10, 2155—2161
14. **Hutchings I.M. and Shipway Ph.** *Tribology, Friction & Wear of Engineering Materials*. (2nd Edition). — Oxford, UK: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd. — 2017
  15. **Cheng S., Spencer J.A., and Milligan W.W.** Strength and Tension/Compression Asymmetry in Nanostructured and Ultrafine-Grain Metals // *Acta Mater*. — 2003 (**51**), 4505—4518

## References

1. **de Almeida E.A. dos S., Milan J.C.G., Costa H.L., Krelling A.P., and da Costa C.E.** Sliding Wear of Borided Sintered AISI M2 Steel Coated with Al-TiN/CrN Multilayer // *Wear*. — 2018 (**410-411**), 11—24. DOI:10.1016/j.wear.2018.05.025
2. **Shapovalov V.V., Sladkovski A., and Erkenov A.Ch.** Actual Problems of Modern Tribotechnology and Ways of Solution // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. — 2015 (**658**), 64—75
3. **Kolesnikov V.I., Ozyabkin A.L., and Novikov E.S.** Friction, Wear, and Monitoring of Heavily Loaded Tribosystems: An Innovative Approach to Studying the Processes // *Journal of Friction and Wear*. — 2019 (**40**), 297—302. <https://doi.org/10.3103/S1068366619040056>
4. **Roy M.** Nanocomposite Films for Wear Resistance Applications // in: Roy M. (ed) *Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear*. — Vienna: Springer. — 2013, 45—78
5. **Kolesnikov I.V., Motrenko P.D., Kolesnikov V.I., Manturov D.S.** Povyshenie iznosostojkosti metallicheskikh i metallopolimernyh tribosistem putyom formirovaniya struktury i svojstv ih poverhnostnogo sloya. — М.: ВИНТИ РАН — 2021 (in Russian)
6. **Filonenko S. and Nimchenko T.** Sensitivity of an Acoustic Emission to Wearing of Surfaces of a Composite Material // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. — 2014 (**3**), no. 9, 35—41
7. **Bajburin V.B., Kuznecov V.A. and Chernyshov S.L.** Metody modelirovaniya diagnostiki tverdotel'nyh termouprugih struktur // *Radio-tekhnika*. — 2018, № 9, 65—68 (in Russian)
8. **Dykha A., Matyukh S., and Kalaczyński T.** Diagnostics – Experimental Analysis of Friction Pairs at Stick // *Slip Sliding. MATEC Web of Conferences*. — 2019 (**302**), 01004
9. **Medelyaev I.A.** Osnovy tekhnologii povysheniya rabotosposobnosti uzlov treniya transportnoj tekhniki // *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii*. — 2020, № 12, 547—551 (in Russian)
10. **Builo S.I., Vereskun V.D., Kolesnikov V.I., Manturov D.S., and Popov O.N.** Determining Friction Coefficient at Run-In Stage and Diagnosing the

- Point of Transition to Steady-State Phase Based on Acoustic Emission Signals // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2020 (56), 41—48
11. **Oliveira G.L., Costa C.A., Teixeira S.C.S., and Costa M.F.** The Use of Nano- and Micro-Instrumented Indentation Tests to Evaluate Viscoelastic behavior of Poly (Vinylidene Fluoride) (PVDF) // Polymer Testing. — 2014 (34), 10—16
  12. **Díez-Pascual A.M., Gómez-Fatou M.A., Ania F., and Flores A.** Nanoindentation in Polymer Nanocomposites // Progress in Materials Science. — 2015 (67), 1—94
  13. **Chuang S.-F., Lin S.-Y., Wei P.-J., Han C.-F., Lin J.-F., and Chang H.-C.** Characterization of the Elastic and Viscoelastic Properties of Dentin by a Nanoindentation Creep Test // Journal of Biomechanics. — 2015 (48), no. 10, 2155—2161
  14. **Hutchings I.M. and Shipway Ph.** Tribology, Friction & Wear of Engineering Materials. (2nd Edition). — Oxford, UK: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd. — 2017
  15. **Cheng S., Spencer J.A., and Milligan W.W.** Strength and Tension/Compression Asymmetry in Nanostructured and Ultrafine-Grain Metals // Acta Mater. — 2003 (51), 4505—4518

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)