

УДК 544.77:621.891

## Влияние смазочных сред на основе пентаэритритового тетраэфира на структуру и свойства бронзы в паре трения БрА5—Сталь 45

Л.И. Куксенова<sup>1</sup>, В.И. Савенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
М. Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва 101000, Россия

<sup>2</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,  
Ленинский пр., д. 31, корп. 4, г. Москва 119071, Россия

Поступила в редакцию 09.02.2025.

Методами рентгеноструктурного, рентгенофазового и оптической металлографической микроскопии проведено исследование механизмов влияния смазочных композиций на основе дисперсионной среды — тетраэфира пентаэритрита C<sub>5</sub>–C<sub>9</sub> (ТЭПЭ C<sub>5</sub>–C<sub>9</sub>) с мыльными дисперсными фазами на структуру и физико-механические характеристики поверхностных слоёв бронзы БрА5 после её трения в паре со сталью Ст45. В качестве дисперсных фаз (загустителей) применяли концентрированные поверхностно-активные вещества (ПАВ): литиевое мыло 12-оксистеариновой кислоты (12-LioSt), кальциевое мыло 12-оксистеариновой кислоты (12-CaOSt), а также комплексное кальциевое мыло, включающее композицию солей 12-оксистеариновой и уксусной кислот (k-Ca). Показано, что после трения бронзы во всех смазочных композициях происходит альтернативное, в зависимости от состава композиции, изменение предела текучести поверхностного слоя образцов (эффекты Ребиндера и Роско). Появление в результате трибодеструкции в этом слое внутренних остаточных мезонапряжений запускает механизм восходящей диффузии, вызывающий в материале концентрационное перераспределение компонентов, вплоть до полного удаления атомов легирующего элемента из его приповерхностного слоя (режим избирательный переноса). Показано, что изменения механических характеристик материала и его износостойкость зависят от коллоидно-химических показателей поверхностной и окислительной активности смазочной композиции, определяемых гидрофильно-липофильным балансом молекул её компонент. Так, введение в базовую среду ТЭПЭ C<sub>5</sub>–C<sub>9</sub> добавки 12-LioSt снижает скорость изнашивания бронзы в 1,3 раза, добавки k-Ca — в 6,5 раз, а введение добавки 12-CaOSt повышает эту скорость на 10 %.

**Ключевые слова:** износ, антифрикционные материалы, смазочные композиции, поверхностно-активные вещества, эффект Ребиндера.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-425-440

**Адрес для переписки:**

В.И. Савенко  
Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,  
Ленинский пр., д. 31, корп. 4, г. Москва 119071, Россия  
e-mail: visavenko@rambler.ru

**Address for correspondence:**

V.I. Savenko  
A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry  
of the Russian Academy of Sciences,  
Leninsky Ave., 31, building 4, Moscow 119071, Russia  
e-mail: visavenko@rambler.ru

**Для цитирования:**

Л.И. Куксенова, В.И. Савенко.  
Влияние смазочных сред на основе пентаэритритового тетраэфира на структуру и свойства бронзы в паре трения БрА5—Сталь 45. Трение и износ. 2025. — Т. 46, № 5. — С. 425—440.  
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-425-440

**For citation:**

L.I. Kuksenova and V.I. Savenko.  
[Effect of Pentaerythrite Tetraether-Based Lubricants on the Structure and Properties of Bronze in the BrA5—Steel 45 Friction Pair].  
Trenie i Iznos.  
2025, vol. 46, no. 5, pp. 425—440 (in Russian).  
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-425-440

# Effect of Pentaerythrite Tetraether-Based Lubricants on the Structure and Properties of Bronze in the BrA5—Steel 45 Friction Pair

L.I. Kuksenova<sup>1</sup> and V.I. Savenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>A.A. Blagonravov Institute of Machine Science of the Russian Academy of Sciences,  
M. Kharitonevsky Lane, 4, Moscow 101000, Russia

<sup>2</sup>A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences,  
Leninsky Ave., 31, building 4, Moscow 119071, Russia

Received 09.02.2025.

## Abstract

Using X-ray structural, X-ray phase, and light metallographic microscopy, the mechanisms of the influence of lubricant compositions based on a dispersion medium — C<sub>5</sub>–C<sub>9</sub> pentaerythritol ether (TEPE of the surface layers of BrA5 bronze after its friction with St45 steel were studied. Concentrated surfactants (surfactant-like agents) were used as dispersed phases (thickeners): lithium soap of 12-hydroxystearic acid (12-LioSt), calcium soap of 12-hydroxystearic acid (12-CaoSt), and complex calcium soap, which includes a composition of salts of 12-hydroxystearic and acetic acids (k-Ca). It has been shown that after friction of bronze, there is a variable change in the yield strength of the surface layer of the samples in all lubricant compositions (the Rebinder and Roscoe effects). The appearance of internal residual stresses in this layer as a result of tribo-deformation includes a mechanism of upward diffusion, which causes a concentration redistribution of components in the material, up to a complete cleaning of the subsurface layer from the atoms of the alloying element (selective transfer mode). It has been shown that the adaptive changes in the mechanical characteristics of the material (positive or negative) and its wear resistance depend on the colloidal-chemical indicators of the surface and oxidative activity of the lubricant composition (hydrophilic-lipophilic balance). Thus, adding 12-LioSt to the basic TEPE C<sub>5</sub>–C<sub>9</sub> environment reduces the wear rate of bronze by 1.3 times, adding k-Ca reduces it by 6.5 times, and adding 12-CaoSt increases it by 10 %.

**Keywords:** wear, antifriction materials, lubricant compositions, surfactants, Rebinder effect.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-5-425-440

---

### Адрес для переписки:

В.И. Савенко  
Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,  
Ленинский пр., д. 31, корп. 4, г. Москва 119071, Россия  
e-mail: visavenko@rambler.ru

### Address for correspondence:

V.I. Savenko  
A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry  
of the Russian Academy of Sciences,  
Leninsky Ave., 31, building 4, Moscow 119071, Russia  
e-mail: visavenko@rambler.ru

---

### Для цитирования:

Л.И. Куксенова, В.И. Савенко.  
Влияние смазочных сред на основе пентаэритритового тетраэфира  
на структуру и свойства бронзы в паре трения БрА5—Сталь 45.  
Трение и износ.  
2025. — Т. 46, № 5. — С. 425–440.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-5-425-440

### For citation:

L.I. Kuksenova and V.I. Savenko.  
[Effect of Pentaerythrite Tetraether-Based Lubricants on the Structure  
and Properties of Bronze in the BrA5—Steel 45 Friction Pair].  
*Trenie i Iznos*.  
2025, vol. 46, no. 5, pp. 425–440 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-5-425-440

## Список использованных источников

1. **Чихос Х.** Системный анализ в трибонике. — М.: Мир. — 1982
2. **Трибология: состояние и перспективы:** сборник научных трудов в 4 т. / гл. ред. И.Г. Горячева, М.А. Броновец. — Уфа: РИК УГАТУ. — 2019. ISBN 978-5-4221-0874-9 // Т. 2: Смазка и смазочные материалы / ред. тома С.М. Захаров, И.А. Буяновский. — 2019. ISBN 978-5-4221-0875-6
3. **Adetunla D., Afolalu S., Jen T.C., and Ogundana A.** The Roles of Surfactant in Tribology. Applications of Recent Technology: An Overview // ICMED-ICMPC 2023. E3S Web of Conferences. — 2023 (391), 01012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101012>
4. **Gu H. and Hirayama T.** Effect of surfactant Self-Assembly on Lubrication Performance in Oil-Based Systems: The Role of Reverse Micelles and Vesicles // Front. Mech. Eng. — 2025, no. 11, 1608716. DOI: 10.3389/fmech.2025.1608716
5. **Kuksenova L.I. and Savenko V.I.** Effect of Surface-Active Media on Contact Elastoplastic Deformations of Surface Layers of Metals and Their Tribological Characteristics // Russian Journal of Physical Chemistry A. — 2024 (98), no. 7, 1411—1424
6. **Барабаш В.М., Абиев Р.Ш., Кулов Н.Н.** Обзор работ по теории и практике перемешивания // Теоретические основы химической технологии. — 2018 (52), № 4, 367—383
7. **Фукс Г.И.** Добавки к пластичным смазкам. — М.: Химия. — 1982
8. **Kruglyakov P.M.** Hydrophile-Lipophile Balance of Surfactants and Solid Particles. Physicochemical Aspects and Applications. — Elsevier Science BV. — 2000
9. **Ланге К.Р.** Поверхностно-активные вещества. — СПб.: ЦОП Профессия. — 2004
10. **Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г.** Исследование поверхностных слоев твердых тел методом скользящего рентгеновского пучка. — Казань: КГУ. — 2009
11. **Рыбакова Л.М., Куksenova Л.И.** Структура и износостойкость металла. — М.: Машиностроение. — 1982
12. **Малыгин Г.А.** Механизм деформационного упрочнения и образования дислокационных структур в металлах при больших пластических деформациях // Физика твердого тела. — 2006 (48), № 4, 651—657
13. **Суворов Э.В.** Дифракционный структурный анализ. — М.: Юрайт. — 2023
14. **Диаграммы состояния двойных металлических систем.** Справочник в 3 томах / под общ. ред. Лякишева Н.П. — М.: Машиностроение. — 1996 (1)
15. **Савенко В.И., Щукин Е.Д.** Новые приложения эффекта Ребиндера в трибологии // Трение и износ. — 1992 (13), № 6, 1095—1107
16. **Ping Y.** Uphill Diffusion // in: The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy / Kuangdi X. (eds). — Singapore: Springer. — 2024, 2253—2255.

- [https://doi.org/10.1007/978-981-99-2086-0\\_411](https://doi.org/10.1007/978-981-99-2086-0_411)
17. **Пинес Б.Я.** Очерки по металлофизике. — Харьков: Из-во ХГУ. — 1961
  18. **Kragelskii I.V., Dobychin M.N., and Kombarov V.S.** Friction and Wear Calculation Methods. — Oxford: Pergamon Press. — 1982
  19. **Русанов А.И., Щекин А.К.** Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ. — СПб.: Лань. — 1922
  20. **Русанов А.И.** К термодинамике солубилизации // Коллоидный журнал. — 2021 (83), № 1, 98—106
  21. **Buckley D.H.** Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication. — N.Y.: Elsevier Sci. Pub. — 1981
  22. **Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П.** Проблемы материаловедения в трибологии. — Новосибирск: НЭТИ. — 1991

## References

1. **Chihos H.** System Analysis in Tribonics. — Moscow: Mir. — 1982 (in Russian)
2. **Tribology: State and Prospects: Collection of Scientific Papers in 4 Volumes** / Edited by I.G. Goryacheva and M.A. Bronovets. — Ufa: RIC UGAU. — 2019. ISBN 978-5-4221-0874-9 // Vol. 2: Lubrication and Lubricants / Edited by S.M. Zakharov and I.A. Buyanovsky. — 2019. ISBN 978-5-4221-0875-6 (in Russian)
3. **Adetunla D., Afolalu S., Jen T.C., and Ogundana A.** The Roles of Surfactant in Tribology. Applications of Recent Technology: An Overview // ICMED-ICMPC 2023. E3S Web of Conferences. — 2023 (391), 01012. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339101012>
4. **Gu H. and Hirayama T.** Effect of surfactant Self-Assembly on Lubrication Performance in Oil-Based Systems: The Role of Reverse Micelles and Vesicles // Front. Mech. Eng. — 2025, no. 11, 1608716. DOI: 10.3389/fmech.2025.1608716
5. **Kuksenova L.I. and Savenko V.I.** Effect of Surface-Active Media on Contact Elastoplastic Deformations of Surface Layers of Metals and Their Tribological Characteristics // Russian Journal of Physical Chemistry A. — 2024 (98), no. 7, 1411—1424
6. **Barabash V.M., Abiev R.Sh., Kulov N.N.** Review of Works on the Theory and Practice of Mixing // Theoretical Foundations of Chemical Technology. — 2018 (52), no. 4, 367—383 (in Russian)
7. **Fuchs G.I.** Additives to Plastic Lubricants. — M.: Khimiya. — 1982 (in Russian)
8. **Kruglyakov P.M.** Hydrophile-Lipophile Balance of Surfactants and Solid Particles. Physicochemical Aspects and Applications. — Elsevier Science BV. — 2000
9. **Lange K.R.** Surfactants. — SPb.: COP Profession. — 2004 (in Russian)
10. **Petukhov V.Yu., Gumarov G.G.** Research of surface layers of solids by the method of sliding X-ray beam. — Kazan: KSU. — 2009 (in Russian)

11. **Ryakova L.M., Kuksenova L.I.** Structure and Wear Resistance of Metals. — M.: Mashinostroenie. — 1982 (in Russian)
12. **Malygin G.A.** Mechanism of Deformation Hardening and Formation of Dislocation Structures in Metals under Large Plastic Deformations // Solid State Physics. — 2006 (**48**), no. 4, 651—657 (in Russian)
13. **Suvorov E.V.** Diffraction structural analysis. — M.: Yurayt. — 2023 (in Russian)
14. **Diagrams of state of double metal systems.** Handbook in 3 volumes / Under the general ed. Lyakishev N.P. — M.: Mechanical engineering. — 1996 (**1**) (in Russian)
15. **Savenko V.I. and Shchukin E.D.** New Applications of the Rehbinder Effect in Tribology // Friction and Wear. — 1992 (**13**), no. 6, 1095—1107
16. **Ping Y.** Uphill Diffusion // in: The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy / Kuangdi X. (eds). — Singapore: Springer. — 2024, 2253—2255.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-99-2086-0\\_411](https://doi.org/10.1007/978-981-99-2086-0_411)
17. **Pines B. Ya.** Essays on Metallophysics. — Kharkiv: Kharkiv State University Press. — 1961 (in Russian)
18. **Kragelskii I.V., Dobychin M.N., and Kombalov V.S.** Friction and Wear Calculation Methods. — Oxford: Pergamon Press. — 1982
19. **Rusanov A.I., Shchekin A.K.** Mitsellobrazovanie in solutions of surfactants. — SPb.: Lan. — 1922 (in Russian)
20. **Rusanov A.I.** On the Thermodynamics of Solubilization // Colloid Journal. — 2021 (**83**), no. 1, 98—106 (in Russian)
21. **Buckley D.H.** Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication. — N.Y.: Elsevier Sci. Pub. — 1981
22. **Tushinsky L.I., Poteryaev Yu.P.** Problems of Materials Science in Tribology. — Novosibirsk: NETI. — 1991 (in Russian)

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)