

УДК 621.891: 621.762

Распределение кислорода в поверхностном слое стального контртела из стали 45 в условиях трения без смазочного материала при воздействии электрического тока высокой плотности

М.И. Алеутдинова, В.В. Фадин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
просп. Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия

Поступила в редакцию 30.04.2025.

Цель работы — изучить распределение кислорода в контактном слое стали 45 (контртело) при трении по схеме «pin-on-disk» по стали Ст3 (образец) в условиях трения без смазочного материала под электрическим током высокой плотности ($> 100 \text{ А/см}^2$).

Методом электронной микроскопии показано образование слоя переноса на контактной поверхности контртела и образование расплава на контактной поверхности слоя переноса. Расплав имеет слабые признаки адгезионного взаимодействия, что является показателем высокой вязкости расплава. Рентгеновский спектральный микроанализ контактной поверхности слоя переноса показал содержание в нем 30 ат. % кислорода, который служит показателем образования FeO. Концентрация кислорода на поверхности контакта соответствовала концентрации около 60 об. % FeO. Концентрация кислорода в сечении слоя переноса на расстоянии 3 мкм от поверхности контакта составляет около 10 ат. %, что соответствует около 20 об. % FeO. Методом рентгенофазового анализа установлено преобладание FeO и α -Fe в контактной поверхности слоя переноса стали 45, то есть около 90 об. % FeO. Эти данные косвенно доказывают существование градиента концентрации FeO, направленного в глубину слоя переноса, и позволяют утверждать, что расплав состоит из нейтральных атомов или ионов железа и кислорода.

Увеличение плотности тока в контакте приводит к увеличению электрической проводимости контакта и к уменьшению коэффициента трения. Это позволяет предположить увеличение количества расплава в контактном пространстве при увеличении плотности тока. Также увеличение плотности тока приводит к увеличению стадии скольжения («slip») при скольжении в режиме прерывистого скольжения («stick-slip») и к снижению коэффициента трения. Полученные данные могут служить ориентиром при проектировании токосъёмных узлов трения для мощных электрических двигателей и генераторов.

Ключевые слова: скользящий электрический контакт, коэффициент трения, электрическая проводимость контакта, износ, слой переноса.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-312-322

Адрес для переписки:

М.И. Алеутдинова
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
просп. Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия
e-mail: aleut@ispms.ru

Address for correspondence:

M.I. Aleutdinova
Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian
Branch of Russian Academy of Science,
pr. Akademicheskii, 2/4, Tomsk 634055, Russia
e-mail: aleut@ispms.ru

Для цитирования:

М.И. Алеутдинова, В.В. Фадин.
Распределение кислорода в поверхностном слое стального
контртела из стали 45 в условиях трения без смазочного
материала при воздействии электрического тока высокой
плотности.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 4. — С. 312–322.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-312-322

For citation:

M.I. Aleutdinova and V.V. Fadin.
[Distribution of Oxygen in Surface Layer of Steel Counterbody
from C45 Steel under Friction Conditions without Lubricant under
Action of High-Density Electric Current].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 4, pp. 312–322 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-312-322

Distribution of Oxygen in Surface Layer of Steel Counterbody from C45 Steel under Friction Conditions without Lubricant under Action of High-Density Electric Current

M.I. Aleutdinova and V.V. Fadin

*Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of Russian Academy of Science,
pr. Akademicheskii, 2/4, Tomsk 634055, Russia*

Received 30.04.2025.

Abstract

The aim of the work is to study the distribution of oxygen in the contact layer of steel 45 during pin-on-ring dry friction against C235 steel under high-density electric current ($> 100 \text{ A/cm}^2$).

The formation of a transfer layer on the contact surface of the counterbody and the formation of a melt on the contact surface of the transfer layer were shown by the electron microscopy method. The melt has weak signs of adhesive interaction, which is an indicator of high melt viscosity. X-ray spectral microanalysis of the contact surface of the transfer layer showed an oxygen content of 30 at. %, which serves as an indicator of FeO formation. The oxygen concentration corresponded to a concentration of about 60 vol. % FeO. The oxygen concentration in the cross-section of the transfer layer at a distance of $3 \text{ }\mu\text{m}$ from the contact surface was about 10 at. % that corresponds to about 20 vol. % FeO. The X-ray phase analysis method established the predominance of FeO and $\alpha\text{-Fe}$ in the contact surface of the transfer layer of C45 steel, i. e. about 90 vol. % FeO. These data indirectly prove the existence of a FeO concentration gradient directed into the depth of the transfer layer and allow us to state that the melt consists of neutral atoms or ions of iron and oxygen.

An increase in the current density in the contact leads to an increase in the electrical conductivity of the contact and to a decrease in the friction coefficient. This allows us to assume an increase in the amount of melt in the contact space with an increase in the current density. An increase in the current density leads also to an increase in the sliding stage (“slip”) during sliding in the stick–slip mode and to a decrease in the friction coefficient. The obtained data can serve as a guideline in the design of current-collecting friction units for powerful electric motors and generators.

Keywords: sliding electric contact, friction coefficient, contact conductivity, wear, transfer layer.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-312-322

Адрес для переписки:

М.И. Алеутдинова
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
просп. Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия
e-mail: aleut@ispms.ru

Address for correspondence:

M.I. Aleutdinova
Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian
Branch of Russian Academy of Science,
pr. Akademicheskii, 2/4, Tomsk 634055, Russia
e-mail: aleut@ispms.ru

Для цитирования:

М.И. Алеутдинова, В.В. Фадин.
Распределение кислорода в поверхностном слое стального
контртела из стали 45 в условиях трения без смазочного
материала при воздействии электрического тока высокой
плотности.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 4. — С. 312–322.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-312-322

For citation:

M.I. Aleutdinova and V.V. Fadin.
[Distribution of Oxygen in Surface Layer of Steel Counterbody
from C45 Steel under Friction Conditions without Lubricant under
Action of High-Density Electric Current].
Trenie i Izнос.
2025, vol. 46, no. 4, pp. 312–322 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-312-322

Список использованных источников

1. **Kragelsky I.V., Dobychin M.N., and Kombarov V.S.** Friction and Wear Calculation Methods. — New York: Pergamon Press. — 1982
2. **Sosnovskiy L.A.** Tribo-Fatigue: Wear-Fatigue Damage and Its Prediction. — Verlag, Berlin, Heidelberg: Springer. — 2005
3. **Алеутдинова М.И., Фадин В.В., Колубаев А.В.** Об изнашивании металлических материалов, нагруженных трением скольжения и электрическим током высокой плотности // Письма о материалах. — 2014 (4), № 3, 149—152. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2014-3-149-152>
4. **Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Rubtsov V.Ye., and Aleutdinova V.A.** Structure and Worn Surface Morphology on Copper Containing Composites under Dry Sliding with High Contact Current Density // Key Eng. Mater. — 2016 (712), 137—142. DOI: 10.4028/wwwscientific.net/KEM.712.137
5. **Aleutdinova M.I. and Fadin V.V.** Structure of the Contact Layers of Steel and Their Deterioration in Dry Sliding Against Steel under High-Density Electric Currents at Different Turn Ratios of a Supply Transformer // Rus. Phys. J. — 2024 (67), no. 1, 1—8. DOI: 10.1007/s11182-024-03081-9.
6. **Waseda Y., Matsubara E., and Shinoda K.** X-Ray Diffraction Crystallography. Introduction, Examples and Solved Problems. — London, New York: Springer Heidelberg Dordrecht, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. — 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-16635-8
7. **Yin Cun-hong, Liang Yi-long, Liang Yu., Li W., and Yang M.** Formation of a Self-Lubricating Layer by Oxidation and Solid-State Amorphization of Nano-Lamellar Microstructures during Dry Sliding Wear Tests // Acta Materialia. — 2019 (166), 208—220. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.12.049>
8. **Wang S.Q., Wei M.X., and Zhao Y.T.** Effects of the Tribo-Oxide and Matrix on Dry Sliding Wear Characteristics and Mechanisms of a Cast Steel // Wear. — 2010 (269), 424—434. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.028>
9. **Kato H.** Effects of Supply of Fine Oxide Particles onto Rubbing Steel Surfaces on Severe-Mild Wear Transition and Oxide Film Formation // Tribol. Int. — 2008 (41), 735. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.01.001>
10. **Mansori M.El., Paulmier D., Ginzler J., and Horvath M.** Lubrication Mechanisms of a Sliding Contact by Simultaneous Action of Electric Current and Magnetic Field // Wear. — 1999 (225–229), 1011—1016. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00070-8)
11. **Zhao H., Feng Y., Zhou Z., Qian G., Zhang J., Huang X., and Zhang X.** Effect of Electrical Current Density, Apparent Contact Pressure, and Sliding Velocity on the Electrical Sliding Wear Behavior of Cu–Ti₃AlC₂ Composites // Wear. — 2020 (444–445), 203156. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203156>
12. **Ferreira J., Farias A., Leonardi F., Bordinassi Ed.C., Bortolussi R., and Delijaicov S.**

Dataset on Critical Angular Clamping Speeds of Fasteners // Data in Brief. — 2024 (52), 110022. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.110022>

13. **Zhang Ch., Keten S., Derome D., and Carmeliet J.** Hydrogen Bonds Dominated Frictional Stick-Slip of Cellulose Nanocrystals // Carbohydrate Polymers. — 2021 (258), 117682. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117682>
14. **Mei G., Fu W., Chen G., Zhang W.** Effect of High-Density Current on the Wear of Carbon Sliders Against Cu–Ag Wires // Wear. — 2020 (452–453), 203275. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203275>

References

1. **Kragelsky I.V., Dobychin M.N., and Kombarov V.S.** Friction and Wear Calculation Methods. — New York: Pergamon Press. — 1982
2. **Sosnovskiy L.A.** Tribo-Fatigue: Wear-Fatigue Damage and Its Prediction. — Verlag, Berlin, Heidelberg: Springer. — 2005
3. **Aleutdinova M.I., Fadin V.V., Kolubaev A.V.** On wear of metal materials loaded with sliding friction and high-density electric current // Letters on Materials. — 2014 (4), no. 3, 149—152. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2014-3-149-152> (in Russian)
4. **Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Rubtsov V.Ye., and Aleutdinova V.A.** Structure and Worn Surface Morphology on Copper Containing Composites under Dry Sliding with High Contact Current Density // Key Eng. Mater. — 2016 (712), 137—142. DOI: 10.4028/wwwscientific.net/KEM.712.137
5. **Aleutdinova M.I. and Fadin V.V.** Structure of the Contact Layers of Steel and Their Deterioration in Dry Sliding Against Steel under High-Density Electric Currents at Different Turn Ratios of a Supply Transformer // Rus. Phys. J. — 2024 (67), no. 1, 1—8. DOI 10.1007/s11182-024-03081-9.
6. **Waseda Y., Matsubara E., and Shinoda K.** X-Ray Diffraction Crystallography. Introduction, Examples and Solved Problems. — London, New York: Springer Heidelberg Dordrecht, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. — 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-16635-8
7. **Yin Cun-hong, Liang Yi-long, Liang Yu., Li W., and Yang M.** Formation of a Self-Lubricating Layer by Oxidation and Solid-State Amorphization of Nano-Lamellar Microstructures during Dry Sliding Wear Tests // Acta Materialia. — 2019 (166), 208—220. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.12.049>
8. **Wang S.Q., Wei M.X., and Zhao Y.T.** Effects of the Tribo-Oxide and Matrix on Dry Sliding Wear Characteristics and Mechanisms of a Cast Steel // Wear. — 2010 (269), 424—434. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.028>
9. **Kato H.** Effects of Supply of Fine Oxide Particles onto Rubbing Steel Surfaces on Severe-Mild Wear Transition and Oxide Film Formation // Tribol. Int. — 2008 (41), 735. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.01.001>

10. **Mansori M.El., Paulmier D., Ginsztler J., and Horvath M.** Lubrication Mechanisms of a Sliding Contact by Simultaneous Action of Electric Current and Magnetic Field // *Wear*. — 1999 (**225–229**), 1011—1016. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00070-8)
11. **Zhao H., Feng Y., Zhou Z., Qian G., Zhang J., Huang X., and Zhang X.** Effect of Electrical Current Density, Apparent Contact Pressure, and Sliding Velocity on the Electrical Sliding Wear Behavior of Cu-Ti₃AlC₂ Composites // *Wear*. — 2020 (**444–445**), 203156. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203156>
12. **Ferreira J., Farias A., Leonardi F., Bordinassi Ed.C., Bortolussi R., and Delijaicov S.** Dataset on Critical Angular Clamping Speeds of Fasteners // *Data in Brief*. — 2024 (**52**), 110022. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.110022>
13. **Zhang Ch., Keten S., Derome D., and Carmeliet J.** Hydrogen Bonds Dominated Frictional Stick-Slip of Cellulose Nanocrystals // *Carbohydrate Polymers*. — 2021 (**258**), 117682. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117682>
14. **Mei G., Fu W., Chen G., Zhang W.** Effect of High-Density Current on the Wear of Carbon Sliders Against Cu-Ag Wires // *Wear*. — 2020 (**452–453**), 203275. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203275>

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