

УДК 621.891: 621.762

Особенности разрушения контактной поверхности стали Ст3 и её износ при сухом скольжении по стали под переменным током

М.И. Алеутдинова, В.В. Фадин

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

Поступила в редакцию 17.12.2024.

После доработки 11.02.2025.

Принята к публикации 18.02.2025.

Исследовано сухое скольжение модельных образцов стали Ст3 по стали 45 под воздействием переменного тока плотностью до 120 А/см² по схеме сопряжения «pin-on-ring». Изучены возможности увеличения износостойкости путём изменения одного из геометрических параметров (высоты) образца (pin) и исследована температура держателя образца в разных точках. Было показано, что эта температура может превышать 150 °С в зоне крепления образца. Увеличение температуры держателя образца и интенсивность изнашивания имели нелинейный характер в соответствии с кривой, близкой к экспоненте при увеличении плотности тока. Скольжение при плотности тока более 100 А/см² происходило в условиях катастрофического изнашивания. Наблюдалось образование слоя переноса толщиной около 20 мкм на поверхности контакта образцов. С помощью рентгеновского фазового анализа было установлено, что слой переноса содержит более 70 % FeO. Анализ поверхностей изнашивания позволил выявить механизм разрушения контактных слоёв, который выражался в разделении номинальной площади контакта на два сектора. Граница между секторами была вполне чёткая и перпендикулярная к направлению скольжения. Сектор, направленный навстречу набегающей контактной поверхности контртела, имел следы адгезии, пропахивания и т.п., которые обычно появляются при скольжении без тока. Другой сектор имел признаки деформации, аналогичные деформации вязкой жидкости, а следы адгезии не наблюдались. Коэффициент трения уменьшался при увеличении плотности тока и не изменял своего поведения при переходе в режим катастрофического изнашивания. Представленные закономерности наблюдались на качественном уровне независимо от высоты образцов. Количественно различались только температуры нагрева держателя образца. Результаты работы будут полезны при создании реального узла трения, работающего в условиях скользящего токосъёма с высокой плотностью тока.

Ключевые слова: скользящий электроконтакт, износ, контактный слой, вязкое пластическое течение, релаксация напряжений, коэффициент трения.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-76-85

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.
Особенности разрушения контактной поверхности стали Ст3 и её износ при сухом скольжении по стали под переменным током. Трение и износ. 2025. – Т. 46, № 1. – С. 76–85.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-76-85

For citation:

M.I. Aleutdinova and V.V. Fadin.
[Features of Deterioration of the Contact Surface of C235 Steel and Its Wear in Dry Sliding Against Steel under Alternating Current]. *Trenie i Iznos*. 2025, vol. 46, no. 1, pp. 76–85 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-76-85

Features of Deterioration of the Contact Surface of C235 Steel and Its Wear in Dry Sliding Against Steel under Alternating 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 17.12.2024.

Revised 11.02.2025.

Accepted 18.02.2025.

Abstract

Dry sliding of model samples of C235 steel against 45 steel under alternating current with a density of up to 120 A/cm² using the pin-on-ring configuration was investigated. The possibilities of increasing wear resistance by changing one of the geometric parameters (height) of the sample (pin) were studied and the temperature of the sample holder at different points was investigated. It was shown that this temperature can exceed 150 °C in the sample mounting zone. The increase in the temperature of the sample holder and the wear intensity were nonlinear in accordance with a curve close to an exponential function with increasing current density. Sliding at a current density higher than 100 A/cm² occurred under conditions of catastrophic wear. Formation of a transfer layer with a thickness of about 20 μm was observed on the contact surface of the samples. Using X-ray phase analysis, it was found that the transfer layer contains more than 70 % FeO. The analysis of wear surfaces allowed to reveal the mechanism of contact layers deterioration, which was presented as the division of the nominal contact area into two sectors. The boundary between the sectors was quite clear and perpendicular to the sliding direction. The sector directed towards the oncoming contact surface of the counterbody had traces of adhesion, plowing, etc., which usually appear during sliding without current. The other sector had signs of deformation similar to the deformation of a viscous liquid. Traces of adhesion were not observed here. The friction coefficient decreased with increasing current density and did not change its behavior upon transition to the catastrophic wear mode. The presented regularities were observed at a qualitative level regardless of the height of the samples. Only the heating temperatures of the sample holder differed quantitatively. The results of the work will be useful in creating a real friction unit operating in sliding current collection with a high current density.

Keywords: sliding electrical contact, wear, contact layer, viscous plastic flow, stress relaxation, friction coefficient.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-76-85

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.
Особенности разрушения контактной поверхности стали Ст3 и её износ при сухом скольжении по стали под переменным током. Трение и износ. 2025. – Т. 46, № 1. – С. 76–85.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-76-85

For citation:

M.I. Aleutdinova and V.V. Fadin.
[Features of Deterioration of the Contact Surface of C235 Steel and Its Wear in Dry Sliding Against Steel under Alternating Current]. *Trenie i Iznos*. 2025, vol. 46, no. 1, pp. 76–85 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-76-85

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Kragelsky I.V., Dobychin M.N., and Komba-
lov V.S.** Friction and Wear Calculation Methods. —
New York: Pergamon Press. — 1982
2. **Bowden F.P. and Tabor D.** Friction: An Introduc-
tion to Tribology. — Anchor, New York: Anchor
Press. — 1973
3. **Sosnovskiy L.A.** Tribo-Fatigue: Wear-Fatigue
Damage and Its Prediction. — Verlag, Berlin, Hei-
delberg: Springer. — 2005
4. **Wang X., Song K., Duan J., Feng Ji., Huang T.,
and Xing Ji.** Current-Carrying Tribological
Behavior and Wear Mechanism of CuW Composites
with Different W Content // Tribol. Int. — 2024
(200), 110125. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110125>
5. **Aleutdinova M.I. and Fadin V.V.** Influence of the
FeO Presence in the Contact Space on the Character
of Dry Sliding of Metals under Electric Current //
AIP Conf. Proc. — 2023 (2899), 020006.
<https://doi.org/10.1063/5.0162747>
6. **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.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.028>
7. **Aleutdinova M.I. and Fadin V.V.** Variations in the
Contact Layer Structure of Low-Carbon Steel in
Sliding Against a Steel Counterbody with Different
Nominal Contact Areas under a High-Density Elec-
tric Current // Russ. Phys. J. — 2023 (66), no. 6,
605—611. DOI 10.1007/s11182-023-02982-53
8. **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 Heidel-
berg. — 2011. DOI 10.1007/978-3-642-16635-8
9. **Wang S.Q., Wang L., Zhao Y.T., Sun Y.,
and Yang Z.R.** Mild-to-Severe Wear Transition
and Transition Region of Oxidative Wear in
Steels // Wear. — 2013 (306), 311—320.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.08.017>
10. **Cao L., Hou C., Tang F., Liang S., Luan J.,
Jiao Z. et al.** Thermal Stability and High-Tempera-
ture Mechanical Performance of Nanostructured
W-Cu-Cr-ZrC Composite // Compos. B. — 2021
(208), 108600. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108600>
11. **Fadin V.V., Aleutdinova M.I., and Kolubaev A.V.**
Effect of High-Density Electric Current on Wear and
Average Temperature of Steel/Steel Triboelectric Con-
tact // J. Friction and Wear. — 2018 (39), no. 4, 294—
298. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068366618040050>
12. **Gao G.Q., Wu G.N., and Zhang W.H.** Experimen-
tal Research on the Friction and Wear Properties
of a Contact Strip of a Pantograph–Catenary System
at the Sliding Speed of 350 km/h with Electric Cur-
rent // Wear. — 2015 (332-333), 949—955.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.11.004>

13. **Madah F., Dehghanian Ch., and Amadeh Ah.Ali.**
Investigations on the Wear Mechanisms of Electro-
less Ni–B Coating During Dry Sliding and Endur-
ance Life of the Worn Surfaces // Surface & Coat-
ings Technology. — 2015 (282), 6—15.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.003>
14. **Лариков Л.И., Фельченко В.М., Мазаренко В.Ф., Гуревич С.М., Харченко Г.К.** Ано-
мальное ускорение диффузии при импульсном
разрушении металлов // Технич. Физика. — 1975
(221), no. 5, 1073—1075
15. **Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin N.K.**
Electrical Contacts. Fundamentals, Applications and
Technology. — New York: CRC Press. — 2007

References

1. **Kragelsky I.V., Dobychin M.N., and Komba-
lov V.S.** Friction and Wear Calculation Methods. —
New York: Pergamon Press. — 1982
2. **Bowden F.P. and Tabor D.** Friction: An Introduc-
tion to Tribology. — Anchor, New York: Anchor
Press. — 1973
3. **Sosnovskiy L.A.** Tribo-Fatigue: Wear-Fatigue
Damage and Its Prediction. — Verlag, Berlin, Hei-
delberg: Springer. — 2005
4. **Wang X., Song K., Duan J., Feng Ji., Huang T.,
and Xing Ji.** Current-Carrying Tribological
Behavior and Wear Mechanism of CuW Composites
with Different W Content // Tribol. Int. — 2024
(200), 110125. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110125>
5. **Aleutdinova M.I. and Fadin V.V.** Influence of the
FeO Presence in the Contact Space on the Character
of Dry Sliding of Metals under Electric Current //
AIP Conf. Proc. — 2023 (2899), 020006.
<https://doi.org/10.1063/5.0162747>
6. **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.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.028>
7. **Aleutdinova M.I. and Fadin V.V.** Variations in the
Contact Layer Structure of Low-Carbon Steel in
Sliding Against a Steel Counterbody with Different
Nominal Contact Areas under a High-Density Elec-
tric Current // Russ. Phys. J. — 2023 (66), no. 6,
605—611. DOI 10.1007/s11182-023-02982-53
8. **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 Heidel-
berg. — 2011. DOI 10.1007/978-3-642-16635-8
9. **Wang S.Q., Wang L., Zhao Y.T., Sun Y.,
and Yang Z.R.** Mild-to-Severe Wear Transition
and Transition Region of Oxidative Wear in
Steels // Wear. — 2013 (306), 311—320.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.08.017>
10. **Cao L., Hou C., Tang F., Liang S., Luan J.,**

- Jiao Z. et al.** Thermal Stability and High-Temperature Mechanical Performance of Nanostructured W-Cu-Cr-ZrC Composite // *Compos. B.* — 2021 (208), 108600. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108600>
11. **Fadin V.V., Aleutdinova M.I., and Kolubaev A.V.** Effect of High-Density Electric Current on Wear and Average Temperature of Steel/Steel Triboelectric Contact // *J. Friction and Wear.* — 2018 (39), no. 4, 294—298. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068366618040050>
12. **Gao G.Q., Wu G.N., and Zhang W.H.** Experimental Research on the Friction and Wear Properties of a Contact Strip of a Pantograph–Catenary System at the Sliding Speed of 350 km/h with Electric Current // *Wear.* — 2015 (332-333), 949—955. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.11.004>
13. **Madah F., Dehghanian Ch., and Amadeh Ah.Ali.** Investigations on the Wear Mechanisms of Electroless Ni–B Coating During Dry Sliding and Endurance Life of the Worn Surfaces // *Surface & Coatings Technology.* — 2015 (282), 6—15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.003>
14. **Larikov L.I., Fel'chenko B.M., Mazarenko V.F., Gurevich C.M., Xarchenko G.K.,** Anomal'noe uskorenie diffuzii pri impul'snom razrushenii metallov (Abnormal acceleration of diffusion at pulse destruction of metals) // *Tekhnich. Fizika.* — 1975 (221), no. 5, 1073—1075 (in Russian)
15. **Braunovich M., Konchits V.V., Myshkin N.K.** *Electrical Contacts. Fundamentals, Applications and Technology.* — New York: CRC Press. — 2007

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