

УДК 539.622:548.4

Сопоставительный анализ временной эволюции феноменологических и микроструктурных характеристик трибоматериала при циклическом качении

В.И. Савенко

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Ленинский проспект, 31, корп. 4, г. Москва 119071, Россия

Поступила в редакцию 07.06.2021.

После доработки 20.02.2022.

Принята к публикации 21.02.2022.

На базе экспериментальных данных, полученных методом маятникового трибометра, проведён экспериментально-теоретический анализ закономерностей изменения феноменологических (триботехнических) и микроструктурных характеристик трибоматериала (пластина монокристалла фторида лития) в модельной трибопаре «шар (ШХ15) — плоскость (001) монокристалла» в процессе многоциклового качения. Установлена темпоральная эволюционная взаимосвязь макро- и микрохарактеристик этого процесса. Предложена его физико-математическая модель. Показана ключевая роль микропластической деформации, возникающей в приповерхностном слое анализируемого трибоматериала контактной пары в режиме многоциклового качения. Найдено, что после многоциклового приработки трибоконтакта суммарный коэффициент трения качения в трибопаре на заключительных стадиях процесса затухающих колебаний уменьшается до величины $fr \cong 5 \cdot 10^{-5}$, угол вдавливания увеличивается до значения $\psi \cong 10^{-2}$, а микротвёрдость на дорожке качения вблизи положения равновесия маятника растёт до значения $H_{\mu} \cong 2$ ГПа. Предложенный подход может использоваться для анализа процессов, происходящих в подшипниках качения, применяемых в устройствах высокоточной механики.

Ключевые слова: маятниковый трибометр, трение качения, упругий гистерезис, дислокации.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-114-127

Адрес для переписки:

В.И. Савенко
Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина
РАН,
Ленинский проспект, 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 Prospekt, 31, korp. 4, Moscow 119071, Russia
e-mail: visavenko@rambler.ru

Для цитирования:

В.И. Савенко.
Сопоставительный анализ временной эволюции феноменологических и микроструктурных характеристик трибоматериала при циклическом качении. Трение и износ. 2022. — Т. 43, № 1. — С. 114–127.
DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-114-127

For citation:

V.I. Savenko.
[Comparative Analysis of the Temporal Evolution of the Phenomenological and Microstructural Characteristics of the Tribomaterial under Cyclic Rolling]. *Trenie i Iznos*. 2022, vol. 43, no. 1, pp. 114–127 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-114-127

Comparative Analysis of the Temporal Evolution of the Phenomenological and Microstructural Characteristics of the Tribomaterial under Cyclic Rolling

V.I. Savenko

A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences, Leninsky Prospekt, 31, korp. 4, Moscow 119071, Russia

Received 07.06.2021.

Revised 20.02.2022.

Accepted 21.02.2022.

Abstract

On the basis of experimental data obtained by the pendulum tribometer method, a quantitative analysis of the regularities of changes in the phenomenological (tribotechnical) and microstructural characteristics of the tribomaterial (lithium fluoride single crystal) in the model tribopare “wear resistant steel SHX15 ball (GB material analogues — 2S135, 534A99, 535A99, US analogues — 52100, G52986, J19965) — single crystal plane” in the process of multi-cycle rolling was carried out. The temporal evolutionary relationship of macro- and microcharacteristics of this process has been established. Its physical and mathematical model is proposed. The key role of microplastic deformation occurring in the near-surface layer of the analyzed tribomaterial (lithium fluoride) during multi-cycle rolling is shown. It was found that after multi-cycle running-in of the tribocontact, the total coefficient of rolling friction in the tribopar at the final stages of the oscillation process decreases to the value of $f_r \cong 5 \cdot 10^{-5}$, the angle of indentation increases to the value of $\psi \cong 10^{-2}$, and the microhardness on the rolling pin increases to the value of $H_\mu \cong 2$ GPa. The proposed approach can be used to analyze the processes occurring in rolling bearings used in high-precision mechanics devices.

Keywords: pendulum tribometer, rolling friction, elastic hysteresis, dislocations.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-114-127

Адрес для переписки:

В.И. Савенко
Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина
РАН,
Ленинский проспект, 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 Prospekt, 31, korp. 4, Moscow 119071, Russia
e-mail: visavenko@rambler.ru

Для цитирования:

В.И. Савенко.
Сопоставительный анализ временной эволюции
феноменологических и микроструктурных характеристик
трибоматериала при циклическом качении.
Трение и износ.
2022. — Т. 43, № 1. — С. 114–127.
DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-114-127

For citation:

V.I. Savenko.
[Comparative Analysis of the Temporal Evolution of the
Phenomenological and Microstructural Characteristics of the
Tribomaterial under Cyclic Rolling].
Trenie i Iznos.
2022, vol. 43, no. 1, pp. 114–127 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-114-127

Список использованных источников

1. **Боуден Ф.П., Тейбор Д.** Трение и смазка твердых тел. — М.: Машиностроение. — 1968
2. **Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.** Расчеты на трение и износ. — М.: Машиностроение. — 1977
3. **Джонсон К.** Механика контактного взаимодействия. — М.: Мир. — 1989
4. **Amateau M.F. and Spretnak J.W.** Plastic Deformation of Magnesium Oxide Subjected to Rolling-Contact Stresses // *J. Appl. Phys.* — 1963 (**34**), no. 8, 2340—2345
5. **Dufrane K.F. and Glaeser W.A.** Rolling-Contact Deformation of MgO Single Crystals // *Wear.* — 1976 (**37**), N.1, 21 — 32.
6. **Swain M.V.** Dislocation Generation Beneath Static and Rolling Sphere // *Wear.* — 1978 (**48**), no. 1, 173—180
7. **Зайцев О.В.** Напряженно-деформированное состояние в зоне контакта и сопротивление качению при многократном прокатывании // *Трение и износ.* — 1985 (**6**), № 6, 1048—1054
8. **Чепя П.А.** Деформируемость материала при качении индентора в условиях начального пластического контакта // *Трение и износ.* — 1991 (**12**), № 3, 495—500
9. **Джонсон К.Л.** Пластическое течение поверхностей при циклическом качении и скольжении. // *Трение и износ.* — 1992 (**13**), № 1, 15—20
10. **Савенко В.И.** О рассеянии энергии в квазиупругих материалах при циклическом качении // *Трение и износ.* — 2009 (**30**), № 3, 261—268
11. **Джилавдари И.З., Ризноокая Н.Н.** Феноменологическая теория микрокачаний шарика на пятне контакта // *Трение и смазка в машинах и механизмах.* — 2010 (**5**), № 1, 3—12
12. **Буланов Э.А.** Трение качения шара по плоскости при пластических деформациях // *Трение и износ.* — 2014 (**9**), № 1, 11—14
13. **Izmailov V.P., Karagioz O.V., and Shakhparonov V.M.** Hysteresis Losses In Oscillatory Systems // *Int. Journ. of Non-Linear Mechanics.* — 2015 (**77**), no. 1, 307—311
14. **Савенко В.И., Измайлов В.П., Карагиоз О.В., Силин А.А., Шукин Е.Д.** Применение маятникового метода для анализа механизмов поглощения энергии при качении // *Трение и износ.* — 1988 (**9**), № 2, 211—222
15. **Савенко В.И., Карагиоз О.В.** Взаимосвязь триботехнических и микроструктурных характеристик трибоматериала при циклическом качении // *Трение и износ.* — 2019 (**40**), № 5, 525—534
16. **Марковец М.П.** Определение механических свойств металлов по твердости. — М.: Машиностроение. — 1979
17. **Невзглядов В.Г.** Теоретическая механика. — М.: Физматгиз. — 1959
18. **Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.**

Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. — Киев: Наукова думка. — 1971

19. **Головин И.С.** Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов. — М.: Изд. Дом МИСиС. — 2012
20. **Михин Н.М.** Внешнее трение твердых тел. — М.: Наука. — 1977

References

1. **Bowden F.P. and Tabor D.** The Friction and Lubrication of Solids (Oxford Classic Texts in the Physical Sciences). — Oxford University Press, USA. — 2001
2. **Kragedelskii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.C.** Raschety na trenie i iznos. — M. Mashinostroenie. — 1977 (in Russian)
3. **Johnson K.L.** Contact Mechanics. — Cambridge University Press. — 1987
4. **Amateau M.F. and Spretnak J.W.** Plastic Deformation of Magnesium Oxide Subjected to Rolling-Contact Stresses // *J. Appl. Phys.* — 1963 (**34**), no. 8, 2340—2345
5. **Dufrane K.F. and Glaeser W.A.** Rolling-Contact Deformation of MgO Single Crystals // *Wear.* — 1976 (**37**), no. 1, 21—32
6. **Swain M.V.** Dislocation Generation Beneath Static and Rolling Sphere // *Wear.* — 1978 (**48**), no. 1, 173—180
7. **Zaitcev O.V.** Naprjajenno-deformirovannoe sostojanie v zone contacta i soprotivlenie kacheniju pri mnogokratnom prokatyvanii // *Trenie i iznos.* — 1985 (**6**), № 6, 1048—1054 (in Russian)
8. **Chepa P.A.** Deformiruemost materiala pri kachenii indentora v uslovijah nachalnogo plasticheskogo kontakta // *Trenie i iznos.* — 1991 (**12**), № 3, 495—500 (in Russian)
9. **Johnson K.L.** Plasticheskoe techenie poverchnosti pri ciklicheskom kachenii // *Trenie i iznos.* — 1992 (**13**), № 1, 15—20
10. **Savenko V.I.** O rassejanii energii v kvaziuprugich materialach pri ciklicheskom kachenii // *Trenie i iznos.* — 2009 (**30**), № 3, 261—268 (in Russian)
11. **Djilavdary I.Z., Riznookaja N.N.** Fenomenologicheskaja teorija mikrokachanii sharika na pjatne kontakta // *Trenie i smazka v mashinach i mehanizmach.* — 2010 (**5**), № 1, 3—12 (in Russian)
12. **Bulanov E.A.** Trenie kachenija shara po ploskosti pri plasticheskich deformatsijach // *Trenie i iznos.* — 2014 (**9**), № 1, 11—14 (in Russian)
13. **Izmailov V.P., Karagioz O.V., and Shakhparonov V.M.** Hysteresis Losses In Oscillatory Systems // *Int. Journ. of Non-Linear Mechanics.* — 2015 (**77**), no. 1, 307—311
14. **Savenko V.I., Izmailov V.P., Karagioz O.V., Silin A.A., Shukin E.D.** Primenenie majatnikogo metoda dlja analiza mehanizmov pogloshchenija energii pri kachenii // *Trenie i iznos.* — 1988 (**9**), № 2, 211—222 (in Russian)
15. **Savenko V.I., Karagioz O.V.** Vzaimosvjaz

- tribotechnических I микроструктурных характеристик трибоматериалов при циклическом качении // Трение I износ. — 2019 (**40**), № 5, 525—534 (in Russian)
16. **Markovec M.P.** Opredelenie mechanicheskikh svoystv materialov po tverdosti. — M.: Mashinostroenie. — 1979 (in Russian)
17. **Nevezgljadov V.G.** Teoreticheskaja mehanika. — M.: Fizmatgiz. — 1959 (in Russian)
18. **Pisarenko G.S., Jakovlev A.P., Matveev V.V.** Vibropogloshchajushchie svoystva konstrukcionnykh materialov. — Kiev: Naukova dumka. — 1971 (in Russian)
19. **Golovin I.S.** Vnutrennee trenie I mechanicheskaja spektroskopija metallicheskich materialov. — M.: MISiS. — 2012
20. **Michin N.M.** Vneshnee trenie tverdykh tel. — M.: Nauka. — 1977 (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