

УДК 620.178.162.4, 539.621

Влияние интенсивной пластической деформации и низкотемпературного отжига на поведение меди М1 при трении скольжения без смазочного материала

А.В. Филиппов

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия

Поступила в редакцию 14.02.2025.

Методом равноканального углового прессования и последующего отжига получили образцы меди М1 с различным структурным состоянием. Методами просвечивающей электронной микроскопии и металлографии исследовали структуру образцов до и после проведения испытаний на трение скольжения. В ходе испытаний на растяжение и наноиндентирования определили механические характеристики образцов. В процессе трения по схеме шарик—диск регистрировали коэффициент трения, вибрацию и акустическую эмиссию для выявления особенностей влияния структурного состояния материала на динамику трения. Метод конфокальной лазерной сканирующей микроскопии использовали для оценки износа.

Установлено, что увеличение числа проходов РКУП и отжиг незначительно, не более 8 %, влияют на коэффициент трения скольжения в паре сталь—медь. Показано, что увеличение числа проходов РКУП позволяет снизить износ меди М1 на 26—93 %. После отжига при температуре 200 °С дополнительно снижается износ, на 5—8 %, по сравнению с образцами без отжига. Отжиг при 300 °С приводит к увеличению износа на 37—65 %, по сравнению с образцами без отжига. Низкая пластичность и высокая твердость материала в сильнодеформированном состоянии приводят к формированию толстого приповерхностного слоя, состоящего из смеси окислившихся частиц износа, оксидов меди и фрагментов разрушенной поверхности трения. Отжиг при температурах 200 °С и 300 °С способствует менее выраженному разрушению поверхности образцов, а также окислению и смешиванию с частицами износа в более тонком приповерхностном слое. Полученные в работе результаты указывают на существенное влияние структурного состояния как на механические свойства, так и на особенности процесса трения скольжения и износа меди М1.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, отжиг, медь, трение скольжения, износ, вибрация, акустическая эмиссия, микроструктура.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-240-249

Адрес для переписки:

А.В. Филиппов
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского
отделения Российской академии наук,
пр. Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия
e-mail: avf@ispms.ru

Для цитирования:

А.В. Филиппов.
Влияние интенсивной пластической деформации и
низкотемпературного отжига на поведение меди М1 при трении
скольжения без смазочного материала.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 3. — С. 240—249.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-240-249

Address for correspondence:

A.V. Filippov
Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch
Russian Academy of Sciences,
Academicheskyy ave., 2/4, Tomsk 634055, Russia
e-mail: avf@ispms.ru

For citation:

A.V. Filippov.
[The Influence of Severe Plastic Deformation and Low-Temperature
Annealing on the Behavior of Copper C11000 under Sliding Friction
without Lubricant].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 3, pp. 240—249 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-240-249

The Influence of Severe Plastic Deformation and Low-Temperature Annealing on the Behavior of Copper C11000 under Sliding Friction without Lubricant

A.V. Filippov

*Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
Academicheskyy ave., 2/4, Tomsk 634055, Russia*

Received 14.02.2025.

Abstract

Copper samples of M1 with different structural states were obtained by equal-channel angular pressing and subsequent annealing. The structure of the samples before and after sliding friction tests was studied by transmission electron microscopy and metallography. The mechanical characteristics of the samples were determined during tensile tests and nanoindentation. During friction according to the ball-on-disk scheme, the friction coefficient, vibration and acoustic emission were recorded to identify the features of the influence of the structural state of the material on the friction dynamics. Confocal laser scanning microscopy was used to assess wear.

It was found that an increase in the number of ECAP passes and annealing have an insignificant, no more than 8 %, effect on the sliding friction coefficient in the steel—copper pair. It is shown that an increase in the number of ECAP passes can reduce the wear of M1 copper by 26—93 %. After annealing at a temperature of 200 °C, wear is additionally reduced by 5—8 %, compared to samples without annealing. Annealing at 300 °C leads to an increase in wear by 37—65 %, compared to samples without annealing. Low plasticity and high hardness of the material in a highly deformed state lead to the formation of a thick surface layer consisting of a mixture of oxidized wear particles, copper oxides and fragments of the destroyed friction surface. Annealing at temperatures of 200 °C and 300 °C contributes to less pronounced destruction of the surface of the samples, as well as oxidation and mixing with wear particles in a thinner surface layer. The results obtained in the work indicate a significant effect of the structural state on both the mechanical properties and the features of the sliding friction and wear process of M1 copper.

Keywords: severe plastic deformation, annealing, copper, sliding friction, wear, vibration, acoustic emission, microstructure.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-240-249

Адрес для переписки:

А.В. Филиппов
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского
отделения Российской академии наук,
пр. Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия
e-mail: avf@ispms.ru

Для цитирования:

А.В. Филиппов.
Влияние интенсивной пластической деформации и
низкотемпературного отжига на поведение меди М1 при трении
скольжения без смазочного материала.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 3. — С. 240—249.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-240-249

Address for correspondence:

A.V. Filippov
Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch
Russian Academy of Sciences,
Academicheskyy ave., 2/4, Tomsk 634055, Russia
e-mail: avf@ispms.ru

For citation:

A.V. Filippov.
[The Influence of Severe Plastic Deformation and Low-Temperature
Annealing on the Behavior of Copper C11000 under Sliding Friction
without Lubricant].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 3, pp. 240—249 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-240-249

Список использованных источников / References

1. **Moshkovich A. and Rapoport L.S.** The Effect of the Structural Parameters on the Friction and Wear Properties of Some FCC Metals // *Journal of Materials Research and Technology*. — 2023 (24), 3913—3924. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.034>
2. **Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., and Alexandrov I.V.** Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation // *Progress in Materials Science*. — 2000 (45), 103—189. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9)
3. **Filippov A.V., Tarasov S.Y., Podgornyykh O.A., Fortuna S.V., Shamarin N.N., and Vorontsov A.V.** Wear, Vibration and Acoustic Emission Characterization of Sliding Friction Processes of Coarse-Grained and Ultrafine-Grained Copper // *Wear*. — 2019 (424–425), 78—88. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.014>
4. **Sadykov F.A., Barykin N.P., and Aslanyan I.R.** The Influence of Strain-Heat Processing on Copper Wear // *Wear*. — 1997 (212), 160—164. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00164-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00164-6)
5. **Zhang Y.S., Wang K., Han Z., and Liu G.** Dry Sliding Wear Behavior of Copper with Nano-Scaled Twins // *Wear*. — 2007 (262), 1463—1470. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.012>
6. **Yao B., Han Z., and Lu K.** Correlation between Wear Resistance and Subsurface Recrystallization Structure in Copper // *Wear*. — 2012 (294–295), 438—445. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.008>
7. **Iglesias P., Bermúdez M.D., Moscoso W., and Chandrasekar S.** Influence of Processing Parameters on Wear Resistance of Nanostructured OFHC Copper Manufactured by Large Strain Extrusion Machining // *Wear*. — 2010 (268), 178—184. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.07.009>
8. **Yao Bin, Han Zhong, and Lu Ke.** Impurity Effect on Wear Resistance of Ultrafine-Grained Copper // *Journal of Materials Science & Technology*. — 2012 (28), 481—487. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60086-3](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60086-3)
9. **Filippov A.V., Rubtsov V.E., and Tarasov S.Yu.** Acoustic Emission Study of Surface Deterioration in Tribocontacting // *Applied Acoustics*. — 2017 (117A), 106—112. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.11.007>
10. **Huang K. and Logé R.E.** A Review of dynamic Recrystallization Phenomena in Metallic Materials // *Materials & Design*. — 2016 (111), 548—574. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.012>
11. **Niels Hansen.** Hall–Petch Relation and Boundary Strengthening // *Scripta Materialia*. — 2004 (51), 801—806. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.06.002>
12. **Alawadhi M.Y., Aloraier A.S., Alaskari A.M., Alazemi A.A., and Huang Y.** Effects of Short-Term Annealing on the Thermal Stability and Microstructural Evolution of Oxygen-Free Copper Processed by High-Pressure Torsion // *Materials*. — 2024 (17), 5886. <https://doi.org/10.3390/ma17235886>
13. **Weidner A., Vinogradov A., Vollmer M., Krooß P., Kriegel M.J., Klemm V., Chumlyakov Y., Niendorf T., and Biermann H.** In situ Characterization of the Functional Degradation of a Orientated Fe–Mn–Al–Ni Single Crystal under Compression Using Acoustic Emission Measurements // *Acta Materialia*. — 2021 (220), 117333. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117333>
14. **Savchenko N.L., Filippov A.V., Tarasov S.Y., Dmitriev A.I., Shilko E.V., and Grigoriev A.S.** Acoustic Emission Characterization of Sliding Wear under Condition of Direct and Inverse Transformations in Low-Temperature Degradation Aged Y-TZP and Y-TZP-AL₂O₃ // *Friction*. — 2018 (6), 323—340. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0226-6>
15. **Filippov A.V., Tarasov S.Yu., Fortuna S.V., Podgornyykh O.A., Shamarin N.N., and Rubtsov V.E.** Microstructural, Mechanical and Acoustic Emission-Assisted Wear Characterization of Equal Channel Angular Pressed (ECAP) Low Stacking Fault Energy Brass // *Tribology International*. — 2018 (123), 273—285. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.03.023>
16. **Popov V.L.** Contact Mechanics and Friction. — Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. — 2010. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-10803-7>

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