

УДК 531.43

## Температурная зависимость фрикционных характеристик металлического контакта

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова

Тверской государственный технический университет,  
наб. Аф. Никитина, 22, г. Тверь 170026, Россия

Поступила в редакцию 04.01.2022.

После доработки 20.06.2022.

Принята к публикации 21.06.2022.

Отражены результаты экспериментов, продолжающих исследования особенностей влияния температуры на фрикционные характеристики металлических пар трения. Особенности заключаются в неоднозначности этого влияния, связанной с предысторией контакта, то есть с той последовательностью изменения температуры, которая предшествовала данному состоянию. Объектом исследования выбрана пара трения золото — сплав золота с медью (80 % Au, 20 % Cu). Экспериментально исследовано влияние температуры на максимальную силу статического трения, на коэффициенты статического трения по Амонтону и Кулону и на удельную силу статического трения в процессе нагревания контакта от комнатной температуры до максимальной и охлаждения контакта от максимальной температуры до комнатной. Эксперименты проводились по схеме трения шар — плоскость: сферический образец с радиусом закругления 0,5 мм из сплава Au80Cu20 контактировал с плоским образцом из золота (Au99,99). Нормальная нагрузка на контакт изменялась в пределах 0,5—4 мН, температура — в пределах 21—130 °С. Показано, что экспериментальная зависимость силы трения от нормальной силы в контакте адекватно описывается линейными уравнениями регрессии: одночленным (закон Амонтона) и двучленным (закон Кулона). Коэффициенты линейных моделей регрессии (коэффициенты трения по Амонтону и Кулону) статистически значимы на уровне  $p = 0,05$ , при этом они не зависят от нормальной нагрузки. Значения коэффициентов пропорциональности (коэффициентов трения) в двучленной регрессионной зависимости силы трения от нормальной силы в среднем на 12 % меньше аналогичных коэффициентов в одночленной регрессионной зависимости. Характер температурных зависимостей силы статического трения и коэффициентов трения по Амонтону и Кулону при нагревании и охлаждении контакта практически совпадает, гистерезис в этих зависимостях не проявляется. Результаты имеют теоретическое и практическое значение для повышения качества и надёжности скользящих электрических контактов, испытывающих нагрев в результате джоулева тепла.

**Ключевые слова:** коэффициент трения, удельная сила трения, температура, температурная предыстория, металлический контакт.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-3-265-273

---

**Адрес для переписки:**

В.В. Измайлов  
Тверской государственный технический университет,  
наб. Аф. Никитина, 22, г. Тверь 170026, Россия  
e-mail: iz2v2@mail.ru

**Address for correspondence:**

V.V. Izmailov  
Tver State Technical University,  
Af. Nikitin embankment, 22, Tver 170026, Russia  
e-mail: iz2v2@mail.ru

**Для цитирования:**

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова.  
Температурная зависимость фрикционных характеристик  
металлического контакта.  
Трение и износ.  
2022. — Т. 43, № 3. — С. 265—273.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-3-265-273

**For citation:**

V.V. Izmailov and M.V. Novoselova.  
[The Temperature Dependence of the Frictional Characteristics of a  
Metal Contact].  
Trenie i Iznos.  
2022, vol. 43, no. 3, pp. 265—273 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-3-265-273

# On the Temperature Dependence of the Frictional Characteristics of a Metal Contact

V.V. Izmailov and M.V. Novoselova

Tver State Technical University,  
Af. Nikitin embankment, 22, Tver 170026, Russia

Received 04.01.2021.

Revised 20.06.2022.

Accepted 21.06.2022.

## Abstract

The results of experiments continuing the study of the features of the effect of temperature on the frictional characteristics of metal friction pairs are reflected. The features lie in the ambiguity of this effect associated with the prehistory of the contact, i. e. with the sequence of temperature changes that preceded this state. The object of research is a friction pair gold vs gold-copper alloy (80 % Au, 20 % Cu). The following temperature effects have been investigated experimentally during the heating of the contact from room temperature to the maximum one and cooling of the contact from the maximum temperature to room one: the temperature effect on the maximum force of static friction, on the coefficients of static friction according to Amontons and Coulomb and on the specific force of static friction. The experiments were carried out according to the ball — plane friction scheme: a spherical sample with a radius of curvature of 0.5 mm made of the Au80Cu20 alloy was in contact with a flat sample of gold (Au99.99). Normal contact load varied in the range of 0.5—4 mN, temperature varied in the range of 21—130 °C. It is shown that the experimental dependence of the friction force on the normal force in contact is adequately described by linear regression equations: single-term (Amontons' law) and binomial (Coulomb's law). The coefficients of linear regression models (Amontons and Coulomb friction coefficients) are statistically significant at the  $p = 0.05$  level, at the same time they do not depend on the normal load. The values of the proportionality coefficients (friction coefficients) in the binomial regression dependence of the friction force on the normal force are on average 12 % less than the analogous coefficients in the single-term regression dependence. The nature of the temperature dependences of the static friction force and the Amontons and Coulomb friction coefficients sensibly coincides with heating and cooling of the contact; hysteresis does not appear in these dependences. The results are of theoretical and practical importance for improving the quality and reliability of sliding electrical contacts that are heated as a result of Joule heat.

**Keywords:** coefficient of friction, specific friction force, temperature, temperature prehistory, metal contact.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-3-265-273

---

### Адрес для переписки:

В.В. Измайлов  
Тверской государственный технический университет,  
наб. Аф. Никитина, 22, г. Тверь 170026, Россия  
e-mail: iz2v2@mail.ru

### Для цитирования:

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова.  
Температурная зависимость фрикционных характеристик  
металлического контакта.  
Трение и износ.  
2022. — Т. 43, № 3. — С. 265—273.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-3-265-273

---

### Address for correspondence:

V.V. Izmailov  
Tver State Technical University,  
Af. Nikitin embankment, 22, Tver 170026, Russia  
e-mail: iz2v2@mail.ru

### For citation:

V.V. Izmailov and M.V. Novoselova.  
[The Temperature Dependence of the Frictional Characteristics of a  
Metal Contact].  
*Trenie i Iznos*.  
2022, vol. 43, no. 3, pp. 265—273 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2022-43-3-265-273

## Список использованных источников

1. Гурский Б.Э., Чичинадзе А.В. Тепловая задача трения // Современная трибология: Итоги и перспективы. — М.: Издательство ЛКИ. — 2014, 297—319
2. Федоров С.В. Тепловые (температурные) принципы совместимого трения // Трение и износ. — 2022 (43), № 2, 210—220
3. Popov V.L. Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications. — Berlin: Springer-Verlag GmbH. — 2017
4. Крюни Н.К., Мигранов М.Ш. Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопрежений. — М.: Инновационное машиностроение. — 2016
5. Dohda K, Boher C., Rezai-Aria F., Mahayotsanun N. Tribology in metal forming at elevated temperatures // Friction. — 2015 (3), no. 1, 1—27
6. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. — Долгопрудный: Интеллект. — 2008
7. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Влияние температуры и температурной предыстории на фрикционные характеристики металлических пар трения // Трение и износ. — 2020 (41), № 6, 671—676
8. Živković M., Matejić M., Miljanić D., Brzaković Lj., and Kočović V. Influence of the Previous Preheating Temperature on the Static Coefficient of Friction with Lubrication // Tribology in Industry. — 2016 (38), no. 4, 585—589
9. Ko H.E., Kwan S.G., Park H.W., and Caron A. Chemical Effects on the Sliding Friction of Ag and Au (111) // Friction. — 2018 (6), no. 1, 84—97
10. Electrical Contacts: Principles and Applications / ed. by P.G. Slade. — CRC Press. — 2014
11. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала: пат. РФ № 2150688; опубл. 10.06.2000. Бюл. № 16 / В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, И.Н. Нестерова, А.А. Иванова
12. Popova E. and Popov V.L. The Research Works of Coulomb and Amontons and Generalized Laws of Friction // Friction. — 2015 (3), no. 2, 183—190
13. Ringlein J. and Robbins M.O. Understanding and Illustrating the Atomic Origins of Friction // Am. J. Phys. — 2004 (72), no. 7, 884—891
14. Владимиров Г.Г. Физика поверхности твердых тел: учебное пособие. — СПб.: Лань. — 2016
15. Свойства элементов: справочник. Кн. 1. — М.: Руда и Металлы. — 2003

## References

1. Gursky B.E., Chichinadze A.V. Thermal problem of friction // Modern tribology: Results and prospects. — M.: Publishing house LKI. — 2014, 297—319 (in Russian)
2. Fedorov S.V. Thermal (Temperature) Principles of Compatible Friction // Trenie i Iznos. — 2022 (43), no. 2, 210—220 (in Russian)
3. Popov V.L. Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications. — Berlin: Springer-Verlag GmbH. — 2017
4. Kryoni N.K., Migranov M.Sh. Coatings and lubricants for high-temperature tribocouplings. — M.: Innovative engineering. — 2016 (in Russian)
5. Dohda K, Boher C., Rezai-Aria F., Mahayotsanun N. Tribology in metal forming at elevated temperatures // Friction. — 2015 (3), no. 1, 1—27
6. Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology. — CRC Press. — 2007
7. Izmailov V.V. and Novoselova M.V. Influence of Temperature and Temperature Prehistory on the Frictional Characteristics of Metal Friction Pairs // Journal of Friction and Wear. — 2020 (41), no. 6, 497—504
8. Živković M., Matejić M., Miljanić D., Brzaković Lj., and Kočović V. Influence of the Previous Preheating Temperature on the Static Coefficient of Friction with Lubrication // Tribology in Industry. — 2016 (38), no. 4, 585—589
9. Ko H.E., Kwan S.G., Park H.W., and Caron A. Chemical Effects on the Sliding Friction of Ag and Au (111) // Friction. — 2018 (6), no. 1, 84—97
10. Electrical Contacts: Principles and Applications / ed. by P.G. Slade. — CRC Press. — 2014
11. Method for determining the coefficient of friction at rest of the surface layers of the material: Pat. RF No. 2150688; publ. 10.06.2000. Bul. no. 16 / V.V. Izmailov, A.F. Gusev, I.N. Nesterova, A.A. Ivanova (in Russian)
12. Popova E. and Popov V.L. The Research Works of Coulomb and Amontons and Generalized Laws of Friction // Friction. — 2015 (3), no. 2, 183—190
13. Ringlein J. and Robbins M.O. Understanding and illustrating the Atomic Origins of Friction // Am. J. Phys. — 2004 (72), no. 7, 884—891
14. Vladimirov G.G. Surface physics of solids: textbook. — SPb.: Lan. — 2016 (in Russian)
15. Properties of elements: reference book. Book 1. — M.: Ore and Metal. — 2003 (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)