

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 23. Выпуск 5.

УДК УДК539.621

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-5-198-205

**Закономерности трения скольжения тел из серого чугуна
в смазочных средах в зависимости от скорости скольжения¹**

А. Д. Бреки, Д. В. Зимин, С. Г. Чулкин, А. А. Москалец, И. А. Шульгин, Е. Б. Седакова,
Ю. В. Галышев, С. Н. Кутепов, О. В. Кузовлева

Бреки Александр Джалюльевич — кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: albreki@yandex.ru

Зимин Денис Викторович — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: tkvaug@mail.ru

Чулкин Сергей Георгиевич — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; Институт проблем машиноведения РАН (г. Санкт-Петербург).

e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Москалец Артём Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: artem.moskalec@gmail.com

Шульгин Игорь Андреевич — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: igorshulgin@polihimnpp.ru

Седакова Елена Борисовна — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; Институт проблем машиноведения РАН (г. Санкт-Петербург).

e-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Галышев Юрий Виталиевич — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: galyshev_yuv@spbstu.ru

Кутепов Сергей Николаевич — кандидат педагогических наук, доцент, Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Кузовлева Ольга Владимировна — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО Российский государственный университет правосудия (г. Москва).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

¹Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» научного проекта: Применение цифрового моделирования и больших данных для повышения эффективности механической обработки титановых лопаток паровых турбин и их эксплуатации в условиях каплеударной эрозии № 22-19-00178.

Аннотация

В статье приведена новая эмпирическая математическая модель для описания изменения коэффициента трения в зависимости от скорости скольжения, включающая такие характеристики как начальная интенсивность изменения коэффициента трения, приращение интенсивности изменения коэффициента трения при переходе на новый режим, резкость изменения коэффициента трения при переходе на новый режим, значение скорости скольжения, соответствующее минимальному «ускорению» изменения коэффициента трения при переходе на новый режим трения. Показана справедливость разработанной математической модели при трении направляющих из серого чугуна СЧ21-40 в среде смазочных масел «Индустриальное 12», «Индустриальное 45», «Автол 18».

Ключевые слова: математическая модель, трение, смазочное масло, серый чугун, кривая Герси-Штрибека.

Библиография: 10 названий.

Для цитирования:

А. Д. Бреки, Д. В. Зимин, С. Г. Чулкин, А.А. Москалец, И.А. Шульгин, Е.Б. Седакова, Ю.В. Галышев, С. Н. Кутепов, О. В. Кузовлева. Закономерности трения скольжения тел из серого чугуна в смазочных средах в зависимости от скорости скольжения // Чебышевский сборник, 2022, т. 23, вып. 5, с. 198–205.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 23. No. 5.

UDC УДК539.621

DOI 10.22405/2226-8383-2022-23-5-198-205

**Regularities of sliding friction of grey cast iron bodies
in lubricating media depending on the sliding speed²**

A. D. Breki, D. V. Zimin, S. G. Chulkin, A. A. Moskalets, I. A. Shulgin, E. B. Sedakova,
Yu. V. Galyshev, S. N. Kutepov, O. V. Kuzovleva

Breki Alexander Dzhalyulevich — candidate of technical Sciences, associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg).

e-mail: albreki@yandex.ru

Zimin Denis Viktorovich — postgraduate student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg).

e-mail: tkvaug@mail.ru

Chulkin Sergey Georgievich — doctor of technical sciences, professor, St. Petersburg State Marine Technical University; Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg).

e-mail: sergej.chulkin@yandex.ru

Moskalets Artem Anatolyevich — candidate of technical sciences, associate professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg).

e-mail: artem.moskalec@gmail.com

²The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation for the priority area of activity of the Russian Science Foundation “Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by individual scientific groups” to the scientific project: Application of digital modeling and big data to improve the efficiency of mechanical processing of titanium steam turbine blades and their operation under conditions of drop impact erosion № 22-19-00178.

Shulgin Igor Andreevich — postgraduate student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg).

e-mail: igorshulgin@polihimnpp.ru

Sedakova Elena Borisovna — doctor of technical sciences, professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences (St. Petersburg).

e-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Galyshev Yuri Vitalievich — doctor of technical sciences, professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg).

e-mail: ugb@mail.ru

Kutepov Sergey Nikolaevich — candidate of pedagogical sciences, associate professor, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University (Tula).

e-mail: kutepovsn@yandex.ru

Kuzovleva Olga Vladimirovna — candidate of technical sciences, associate professor, Russian State University of Justice (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Abstract

The article presents a new empirical mathematical model for describing the change in the friction coefficient depending on the sliding speed, including such characteristics as the initial intensity of the change in the friction coefficient, the increment in the intensity of the change in the friction coefficient when switching to a new mode, the sharpness of the change in the friction coefficient when switching to a new mode, the value sliding speed corresponding to the minimum “acceleration” of the change in the friction coefficient during the transition to a new friction mode. The validity of the developed mathematical model is shown for the friction of guides made of gray cast iron SCh21-40 in the medium of lubricating oils "Industrialnoe 12 "Industrialnoe 45 "Avtol 18".

Keywords: mathematical model, friction, lubricating oil, gray cast iron, Guersey-Striebeck curve.

Bibliography: 10 titles.

For citation:

A. D. Breki, D. V. Zimin, S. G. Chulkin, A. A. Moskalets, I.A. Shulgin, E.B. Sedakova, Yu.V. Galyshev, S. N. Kutepov, O. V. Kuzovleva, 2022, “Regularities of sliding friction of grey cast iron bodies in lubricating media depending on the sliding speed”, *Chebyshevskii sbornik*, vol. 23, no. 5, pp. 198–205.

1. Введение

Известно [1], что большинство направляющих металлорежущих станков работает в режиме смешанного трения. Это объясняется скоростями скольжения, изменяющимися в весьма широких пределах от долей миллиметра до нескольких метров в минуту. Как известно, область смешанного трения характеризуется большим разнообразием условий работы трущихся поверхностей в зависимости от доли сухого, граничного или жидкостного трения в общем процессе трения. Исследованию триботехнических свойств смазочных масел посвящено много работ различной направленности [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. В литературе описаны закономерности изменения коэффициента трения от скорости скольжения для самых различных смазочных масел. Однако эти закономерности в большинстве случаев представлены в виде графиков и таблиц.

С другой стороны, для более качественного выявления закономерностей внешнего трения направляющих в различных смазочных средах, в зависимости от скорости, требуется разработка и верификация новых математических моделей, объединяющих в себе как участки линейного, так и участки нелинейного изменения триботехнических характеристик.

2. Результаты и их обсуждение

В работах [9, 10] предложена следующая зависимость, которая была использована для описания обобщённого закона внешнего трения, а также закона динамики изнашивания:

$$F(x) = C + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta C_i}{s_i} \ln [1 + \exp(s_i \cdot (x - x_i))] . \quad (1)$$

Анализ данных работы [1] позволил предположить, что зависимость коэффициента трения от скорости скольжения, может быть представлена с использованием (1) в следующем виде:

$$f = f_0 - J_{f_0} \cdot \nu_f + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta J_{f_i}}{\Psi_{f_i}} \ln [1 + \exp(\Psi_{f_i}(\nu_f - \nu_{f\Omega_i}))] , \quad (2)$$

где f_0 — исходный коэффициент трения, J_{f_0} — начальная интенсивность изменения коэффициента трения, ν_f — скорость скольжения, ΔJ_{f_i} — приращение интенсивности изменения коэффициента трения при переходе на i -й режим трения, Ψ_{f_i} — резкость изменения коэффициента трения при переходе на i -й режим трения, $\nu_{f\Omega_i}$ — значение скорости скольжения, соответствующее минимальному «ускорению» изменения коэффициента трения при переходе на i -й режим.

В работе [1] Г.А. Левитом и Б.Г. Лурье получены важные зависимости коэффициента трения от скорости скольжения при фрикционном взаимодействии направляющих из серого чугуна СЧ21-40 в среде смазочных масел промышленное 12, промышленное 45, автол 18. Условия испытаний: скольжение бруска из серого чугуна по плоскости из серого чугуна со скоростью от 0 до 1200 мм/мин, при давлении 0,5 кГс/см².

Авторы [1] установили зависимости коэффициента трения от скорости скольжения в графическом виде, однако не было найдено их аналитического представления. В данной работе реализована точная оцифровка графиков из работы [1] и осуществлена аппроксимация выявленных точек с использованием выбранной формулы (2).

На рисунке 1 показаны точки, полученные при оцифровке графика [1] зависимости коэффициента трения от скорости скольжения пары трения в среде масла марки промышленное 12, и соответствующий график аппроксимирующей функции.

Аналитически, зависимость коэффициента трения от скорости скольжения пары трения в среде масла марки промышленное 12 выражается формулой:

$$f = 0,28 - 0,004\nu_f + \left(\frac{0,00377}{0,1} \right) \ln (1 + \exp(0,1(\nu_f - 22))) + \\ + \left(\frac{0,00018}{0,02} \right) \ln (1 + \exp(0,02(\nu_f - 600))) . \quad (3)$$

Интегрирование (3) по всему интервалу скоростей от 0 до 1200 мм/мин и деление полученного результата на длину данного интервала даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,0879.

На рисунке 2 показаны точки, полученные при оцифровке графика [1] зависимости коэффициента трения от скорости скольжения пары трения в среде масла марки промышленное 45, и соответствующий график аппроксимирующей функции.

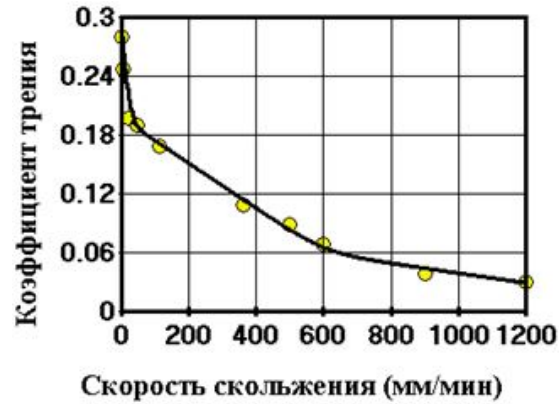


Рис 1: Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения пары трения в среде масла марки индустриальное 12

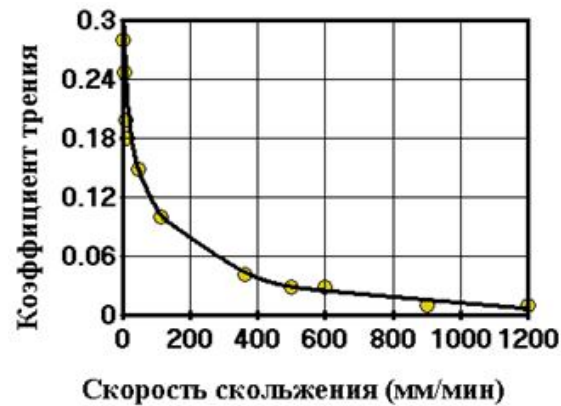


Рис 2: Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения пары трения в среде масла марки индустриальное 45

Аналитически, зависимость коэффициента трения от скорости скольжения пары трения в среде масла марки индустриальное 45 выражается формулой:

$$f = 0,28 - 0,01\nu_f + \left(\frac{0,0093}{0,1}\right) \ln(1 + \exp(0,1(\nu_f - 11))) + \\ + \left(\frac{0,00046}{0,1}\right) \ln(1 + \exp(0,1(\nu_f - 111))) + \left(\frac{0,00021}{0,02}\right) \ln(1 + \exp(0,02(\nu_f - 400))). \quad (4)$$

Интегрирование (4) по всему интервалу скоростей от 0 до 1200 мм/мин и деление полученного результата на длину данного интервала даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,0433.

На рисунке 3 показаны точки, полученные при оцифровке графика [1] зависимости коэффициента трения от скорости скольжения пары трения в среде масла марки Автол 18, и соответствующий график аппроксимирующей функции.

Аналитически, зависимость коэффициента трения от скорости скольжения пары трения в среде масла марки Автол 18 выражается формулой:



Рис 3: Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения пары трения в среде масла марки Автол 18

$$f = 0,24 - 0,011\nu_f + \left(\frac{0,0101}{0,1}\right) \ln(1 + \exp(0,1(\nu_f - 11))) + \\ + \left(\frac{0,00083}{0,1}\right) \ln(1 + \exp(0,1(\nu_f - 111))) + \left(\frac{0,000106}{0,02}\right) \ln(1 + \exp(0,02(\nu_f - 400))). \quad (5)$$

Интегрирование (5) по всему интервалу скоростей от 0 до 1200 мм/мин и деление полученного результата на длину данного интервала даёт среднее значение коэффициента трения, равное 0,0294.

Таким образом, хотя характер зависимости коэффициента трения от скорости скольжения в целом соответствует кривой Герси–Штрибека, аналитическое описание данной зависимости имеет сложный вид с целым рядом переходов.

3. Заключение

В результате проведённого исследования:

1. Показано, что функция, которая была использована для описания обобщённого закона внешнего трения, а также закона динамики изнашивания подходит для описания зависимости коэффициента трения от скорости скольжения в жидкой смазочной среде. Соответственно описывается кривая Герси – Штрибека.
2. Разработана математическая модель для описания изменения коэффициента трения в зависимости от скорости скольжения, включающая такие характеристики как начальная интенсивность изменения коэффициента трения, приращение интенсивности изменения коэффициента трения при переходе на новый режим, резкость изменения коэффициента трения при переходе на новый режим, значение скорости скольжения, соответствующее минимальному «ускорению» изменения коэффициента трения при переходе на новый режим.
3. Реализована оцифровка экспериментальных данных Г.А. Левита и Б.Г. Лурье и проведён их анализ, с использованием разработанной математической модели, подтвердивший справедливость данной эмпирической модели для рассматриваемого комплекса условий испытаний.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левит Г.А., Лурье Б.Г. Исследование механизма смешанного трения в направляющих металлорежущих станков / Теория трения и износа // Акад. наук СССР. Науч. совет по трению и смазкам. 1965. С. 250 – 254.
2. Кустов О.Ю. Эффективность композиции из смазочного масла, нанопорошка оксида алюминия и поверхностно-активного вещества для снижения трения // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2015. Т.1. С. 153-156.
3. Кустов О.Ю., Малинин В.И., Беломытцев О.М. Исследование влияния нанопорошков оксида алюминия на триботехнические свойства масел и определение областей их применения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2014. № 36. С. 131–142.
4. Кустов О.Ю. Получение композиции из смазочного масла, нанопорошка оксида алюминия и ПАВ для снижения трения в подшипниках качения // Вестник Пермского научного центра УрО РАН. 2015. № 2. С. 43–51.
5. Кандева-Иванова М.К., Задорожная Е.А., Мухортов И.В., Леванов И.Г. Изучение влияния нетоксичных добавок в рапсовое масло при экспериментальных исследованиях узлов трения машин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2021. Т.21. № 2. С. 5-14.
6. Breki A.D., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V. Frictional Properties of a Nanocomposite Material with a Linear Polyimide Matrix and Tungsten Diselinate Nanoparticle Reinforcement // Journal of Tribology. 2019. Vol. 141. No 8. pp. 082002.
7. Breki A.D., Chulkin S.G., Dobrovolsky N.M. Mathematical regularities of the sliding friction process of a porous material based on iron impregnated with lubricating oil with dispersed particles of fluorinated graphene // Chebyshevskii sbornik. 2021. Vol. 22. No 1(77). pp. 378-389.
8. Sergeev N.N., I.V. Minaev, Gvozdev A.E. Decarburization and the Influence of Laser Cutting on Steel Structure // Steel in Translation. 2018. Vol. 48. No 5. pp. 313-319.
9. Бреки А.Д. Триботехнические характеристики материалов пар трения и смазочных сред в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.04 / Бреки Александр Джалюльевич; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»]. Санкт-Петербург, 2021. 378 с.
10. Бреки А.Д. Триботехнические характеристики материалов пар трения и смазочных сред в условиях самопроизвольных изменений состояний фрикционного контакта: автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.02.04 / Бреки Александр Джалюльевич; [Место защиты: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого]. - Санкт-Петербург, 2021. 43 с.

REFERENCES

1. Levit G.A., Lurie B.G. 1965, “Investigation of the mechanism of mixed friction in the guides of metal-cutting machine tools”, *Theory of friction and wear, Acad. sciences of the USSR. Scientific advice on friction and lubrication*. 1965. pp. 250–254.

2. Kustov O.Yu. 2015, "The effectiveness of the composition of lubricating oil, aluminum oxide nanopowder and surfactant to reduce friction", *Aerospace engineering, high technologies and innovations*. T.1. pp. 153-156.
3. Kustov O.Yu., Malinin V.I., Belomyttsev O.M. 2014, "Investigation of the influence of aluminum oxide nanopowders on the tribotechnical properties of oils and the determination of their applications", *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering*. No. 36. pp. 131-142.
4. Kustov O.Yu. 2015, "Obtaining a composition from lubricating oil, aluminum oxide nanopowder and surfactants to reduce friction in rolling bearings", *Bulletin of the Perm Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. No. 2. pp. 43-51.
5. Kandeveva-Ivanova M.K., Zadorozhnaya E.A., Mukhortov I.V., Levanov I.G. 2021, "Study of the influence of non-toxic additives in rapeseed oil in experimental studies of friction units of machines", *Bulletin of the South Ural State University. Series: Engineering*. T.21. No.2. pp. 5-14.
6. Breki A.D., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V. 2019, "Frictional Properties of a Nanocomposite Material with a Linear Polyimide Matrix and Tungsten Diselide Nanoparticle Reinforcement", *Journal of Tribology*. Vol. 141. No 8. pp. 082002.
7. Breki A.D., Chulkin S.G., Dobrovolsky N.M. 2021, "Mathematical regularities of the sliding friction process of a porous material based on iron impregnated with lubricating oil with dispersed particles of fluorinated grapheme", *Chebyshevskii sbornik*. Vol. 22. No 1(77). pp. 378-389.
8. Sergeev N.N., Minaev I.V., Gvozdev A.E. 2018, "Decarburization and the Influence of Laser Cutting on Steel Structure", *Steel in Translation*. Vol. 48. No 5. pp. 313-319.
9. Breki A.D. 2021, *Tribological characteristics of materials of friction pairs and lubricating media under conditions of spontaneous changes in the states of friction contact*: dissertation ... Doctor of Technical Sciences: 05.02.04 / Breki Alexander Dzhalevich; [Place of defense: FGAOU VO "St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great"]. St. Petersburg. 378 p.
10. Breki A.D. 2021, *Tribotechnical characteristics of materials of friction pairs and lubricating media under conditions of spontaneous changes in the states of friction contact*: Abstract of the thesis. ... Doctor of Technical Sciences: 05.02.04 / Alexander Dzhalyulyevich Breki; [Place of defense: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. St. Petersburg. 43 p.

Получено: 1.10.2022

Принято в печать: 22.12.2022