

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 7 (145). С. 33-38.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 7 (145). P. 33-38.

Научная статья

УДК 539.621

doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-33-38

Аналитическое представление зависимостей силы трения от температуры при фрикционном взаимодействии пространственно структурированных каучуков со стальной поверхностью

Александр Джалюльевич Бреки^{1, 2}, д.т.н.

¹ Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

² Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
albreki@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4452-3896>

Аннотация. В статье реализован анализ известных зависимостей характеристик трения от температуры. Проанализирована математическая модель зависимости коэффициента внешнего трения Ф.Ф. Линга и Э. Сайбела от температуры, энергий активации формирования и разрушения фрикционных связей и других факторов, разработанная с использованием уравнений абсолютных скоростей химических реакций. Реализована аппроксимация данной модели для случая независимости сдвигового сопротивления по Боудену и Тейбору от температуры. Предложена математическая модель, описывающая зависимости силы трения скольжения от температуры при фрикционном взаимодействии пространственно структурированных каучуков со стальной поверхностью. Отличительной особенностью предложенной математической модели является то, что она может описывать одновременно участки постоянства, линейного и криволинейного изменения силы трения при изменении температуры. Реализована проверка разработанной математической модели посредством оцифровки и обработки экспериментальных данных, полученных при фрикционном взаимодействии брусков из пространственно структурированного натурального каучука и пространственно структурированного каучука СКС-50 с призмой из стали ст.3. При анализе аппроксимирующих зависимостей установлено, что для пространственно структурированного натурального каучука максимальное значение силы трения составляет 2,0 кГс при температуре приблизительно $-37,6^{\circ}\text{C}$, а среднее значение коэффициента трения равно 0,987, для структурированного каучука СКС-50 максимальное значение силы трения составляет 1,84 кГс при температуре приблизительно $31,4^{\circ}\text{C}$, а среднее значение коэффициента трения равно 0,853. Введены новые триботехнические характеристики, которые позволяют более детально охарактеризовать фрикционное взаимодействие в системе «каучук-сталь» при изменении температуры.

Ключевые слова: математическая модель, трение скольжения, пространственно структурированный каучук, температура, фрикционное взаимодействие

Благодарности: работа 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.

Для цитирования: Бреки А.Д. Аналитическое представление зависимостей силы трения от температуры при фрикционном взаимодействии пространственно структурированных каучуков со стальной поверхностью // 2023. № 7 (145). С. 33–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-33-38

Analytic representation of the friction force-temperature relations under the conditions of frictional interaction of spatially-ordered rubbers having steel surface

Alexander D. Breki^{1,2}, D. Eng.

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

² Institute of Problems of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
albreki@yandex.ru

Abstract. The analysis of the known friction-temperature laws is carried out in the article. A mathematical model of external friction of F.F. Ling and E. Seibel coefficient dependence on temperature, activation energies of formation and destruction of friction bonds and other factors, developed using the equations of absolute rates of chemical reactions, is analyzed. An approximation of this model is implemented in temperature independence case for Bowden and Tabor shear strength. A mathematical model, describing sliding friction force-temperature relation under frictional interaction of spatially ordered rubbers having steel surface, is proposed. A distinctive feature of the proposed mathematical model is that it can simultaneously describe areas of constancy, friction force linear and nonlinear scaling under temperature changes. The testing and verification of the developed mathematical model is fulfilled through digitizing and processing experimental data, obtained by the frictional interaction of bars, made of spatially ordered natural rubber and spatially ordered rubber SCS-50 with a prism made of steel st.3. Analyzing the approximating dependencies, it is found, that for spatially ordered natural rubber, the maximum value of the friction force is 2,0 kgf under the temperature of approximately 37,6 °C, and the average value of the friction coefficient is 0,987, for spatially ordered natural rubber, the maximum value of the friction force is 1.84 kgf under the temperature of approximately 31,4 °C, while the average value of the coefficient of friction is 0,853. New tribotechnical characteristics have been introduced making possible to give a more detailed characterization of the frictional interaction in the rubber-steel system for the cases of temperature changes.

Keywords: mathematical model, sliding friction, spatially ordered rubber, temperature, frictional interaction

Acknowledgements: the work was supported by a grant from the Russian Scientific Foundation for the priority activity of the Russian Scientific Foundation «Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by individual scientific groups» of the scientific project: «Application of digital modeling and big data to improve the efficiency of mechanical processing of titanium blades of steam turbines and their operation in the conditions of impact erosion» No. 22-19-00178.

For citation: Breki A.D. Analytic representation of the friction force -temperature relations under the conditions of frictional interaction of spatially-ordered rubbers having steel surface / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 7 (145). P. 33–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-33-38

Каучуки активно используются в качестве материалов триботехнического назначения. При этом известно, что изделия из данных материалов используются в очень широком диапазоне температур. Температура внешней среды может существенно влиять на физические и химические процессы на фрикционном контакте, а соответственно и на характеристики трения. Согласно академику С. И. Губкину зависимость коэффициента трения от температуры имеет вид [1, стр.37]:

$$f = f_0 \cdot \exp(\pm \alpha_T \cdot (T - T_0)), \quad (1)$$

где f – коэффициент трения; f_0 – коэффициент трения при температуре T_0 ; α_T – температурный коэффициент; T – температура.

Исследователи Ф.Ф. Линг и Э. Сайбел [2, стр.17] рассматривают трение скольжения несмазанных поверхностей как процесс формирования и разрушения фрикционных связей с

учётом влияния температуры [3]. Скорости процессов образования и разрушения фрикционных связей авторы рассчитывают, используя уравнения абсолютных скоростей реакций [4, 5]. Константа скорости формирования фрикционных связей [3]:

$$k_g = C_g \cdot \exp\left(-\frac{U_g}{RT}\right), \quad (2)$$

константа скорости разрушения фрикционных связей [3]:

$$k_{de} = C_{de} \cdot \exp\left(-\frac{U_{de}}{RT}\right), \quad (3)$$

где U_g и U_{de} – энергия активации процесса формирования и разрушения фрикционных связей соответственно. Также авторы принимают равенство:

$$C_g = C_{de} = C. \quad (4)$$

Принимая время протекания процесса равным отношению среднего расстояния между неровностями l_r , при котором повторяется

процесс, к скорости скольжения v , после ряда преобразований авторы получили зависимость [3]:

$$f = \frac{\frac{\tau_{fr}}{p_r}}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)} - \frac{\frac{\tau_{fr}}{p_r} \cdot \exp\left[-\frac{l_r C}{v} \cdot \left(\exp\left(-\frac{U_g}{RT}\right) + \exp\left(-\frac{U_{de}}{RT}\right)\right)\right]}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)}, \quad (5)$$

где τ_{fr} – сдвиговое сопротивление (по Боудену и Тейбору) [3], p_r – фактическое давление.

Умножая уравнение обе части (5) на нормальную нагрузку $F_N = p_a A_a$ (произведение номинальной площади и номинального давления) и учитывая (2) и (3) получим:

$$F_f = \frac{(\tau_{fr} p_a A_a) / p_r}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)} - \frac{\frac{\tau_{fr} p_a A_a}{p_r} \cdot \exp\left[-\frac{l_r}{v} \cdot (k_g + k_{de})\right]}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)}. \quad (6)$$

И.В. Крагельский отметил, что использование формулы (5) затруднительно, поскольку нет данных об энергии активации процесса формирования и разрушения фрикционных связей [3]. Функция (5), соответственно и (6) в промежутке $(0; \infty)$ имеет вид, близкий к

сигмоидальному (при грубом допущении, что τ_{fr} слабо зависит от температуры на этапе перехода и некотором интервале после его завершения) и очень быстро приближается к своему пределу (асимптоте):

$$C_f = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{(\tau_{fr} p_a A_a) / p_r}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)} - \frac{\frac{\tau_{fr} p_a A_a}{p_r} \cdot \exp\left[-\frac{l_r}{v} \cdot (k_g + k_{de})\right]}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)} \right]. \quad (7)$$

Соответственно (6) хорошо аппроксимируется функцией логистического типа:

$$F_f \cong \frac{C_f}{1 + \exp(-\psi_T(T - T_\Omega))}, \quad (8)$$

Параметры модели (8) взаимосвязаны с физическими величинами модели (6) и выражают резкость и степень роста силы трения при изменении температуры. Формулы (8) и (1) имеют схожие выражения под экспонентой, но существенно по-разному описывают зависимость характеристик трения от температуры.

С другой стороны, сила трения в случае изменения температуры в зоне трения каучука с металлом может изменяться по более сложным зависимостям по сравнению с (1), (6) и (8), для

которых в настоящее время ещё не создано соответствующих математических моделей. В частности, имеется зависимости $\tau_{fr} = \tau_{fr}(T)$, которая очень неоднозначна. В связи с этим, в границах данной работы, предложена новая математическая модель, описывающая закономерности влияния температуры на трение скольжения стали по каучукам.

В работах [6 – 8 и др.] предложена следующая функция, которая была использована для описания динамики изменения силы трения:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \frac{C_{i,1}x + C_{i,2}}{1 + \exp(-\psi_i(x - x_{\Omega i}))}. \quad (9)$$

Анализ данных работы [9] позволил предположить, что зависимость силы трения от температуры, при трении каучуков по стали может

быть представлена с использованием функции (9), по аналогии с работой [10]:

$$F_f = F_{f0} + \frac{C_{f1}}{1 + \exp(-\psi_{T1}(T - T_{\Omega1}))} - \frac{C_{f2}T + C_{f3}}{1 + \exp(-\psi_{T2}(T - T_{\Omega2}))}. \quad (10)$$

где ψ_{Ti} – резкость изменения силы трения при i -м качественном изменении состояния фрикционного контакта; F_{f0} – начальное значение силы трения до температурного фрикционного перехода; C_{fi} – эмпирические коэффициенты, характеризующие уровень и интенсивность повышения или снижения силы трения; T – температура; $T_{\Omega i}$ – значения температуры, соответствующие максимальной (минимальной) интенсивности изменения силы трения. Формула (10) обобщает (8), а соответственно и (6).

В работе [9] Бартеневым Г.М., Елькиным А.И. получены важные зависимости силы трения от температуры при фрикционном взаимодействии ползуна из каучуков по полированной стальной поверхности. Условия испытаний: скольжение бруска из каучука по стальной плоскости со скоростью 1,0 мм/мин, при нагрузке 1,0 кГс при диапазоне изменения температуры от -200 до 100 °С. Образцы – бруски из пространственно структурированного натурального каучука (натуральный каучук является полимером изопрена $(C_5H_8)_n$) и пространственно структурированного каучука СКС-50 (бутадиенстирольный каучук получается при совместной полимеризацией бутадиена (C_4H_6) и стирола $(CH_2 = CH - C_6H_5)$). В зависимости от процентного содержания стирола каучук выпускают нескольких марок: СКС-10; СКС-30; СКС-50; пластина из стали 3.

Авторами [9] установлены зависимости силы трения от температуры в графическом виде, однако не было найдено их аналитического представления.

В данной работе реализована точная оцифровка графиков из работы [9] и осуществлена аппроксимация выявленных точек с использованием формулы (10).

На рис. 1 показаны точки, полученные при оцифровке графика [9] зависимости силы трения пространственно структурированного натурального каучука по стали 3 от температуры (в вакууме), и соответствующий график аппроксимирующей функции.

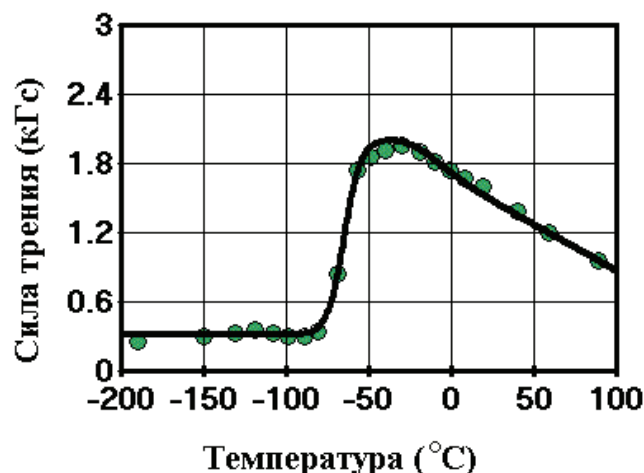


Рис. 1. График зависимости силы трения пространственно структурированного натурального каучука по стали 3 от температуры (в вакууме)

Fig. 1. Graph of friction force of spatially structured natural rubber on steel 3 versus temperature (in vacuum)

Аналитически, зависимость силы трения пространственно структурированного натурального каучука по стали 3 от температуры (в вакууме) выражается формулой:

$$F_f = 0,31 + \frac{1,7}{1 + \exp(-0,2(T + 65))} - \frac{0,008T + 0,34}{1 + \exp(-0,1(T + 18))}. \quad (11)$$

Исследование функции (11) показывает, что максимальное значение силы трения составляет 2,0 кГс при температуре приблизительно -37,6 °С. Интегрирование (11) по всему интервалу от -200 до 100 °С и деление полученного

результата на длину данного интервала температур даёт среднее значение силы трения, равное 0,987 кГс, соответственно средний коэффициент трения в этом случае равен 0,987.

На рис. 2 показаны точки, полученные при оцифровке графика [9] зависимости силы трения пространственно структурированного каучука СКС-50 по стали 3 от температуры (в вакууме), и соответствующий график аппроксимирующей функции.

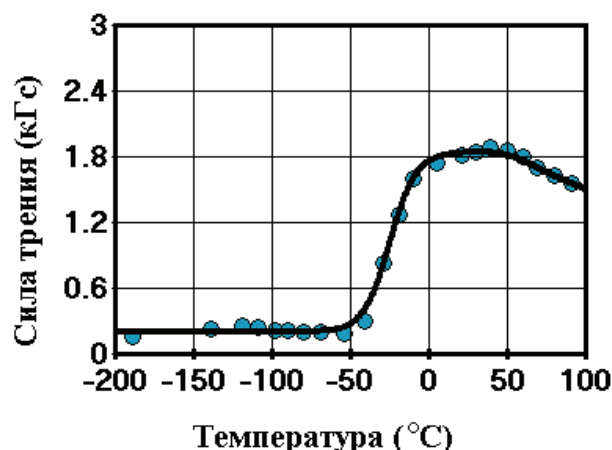


Рис. 2. График зависимости силы трения пространственно структурированного каучука СКС-50 по стали 3 от температуры (в вакууме)

Fig. 2. Graph of the dependence of the friction force of spatially structured rubber SKS-50 on steel 3 on temperature (in vacuum)

Аналитически, зависимость силы трения пространственно структурированного каучука СКС-50 по стали 3 от температуры (в вакууме) выражается формулой:

$$F_f = 0,2 + \frac{1,64}{1 + \exp(-0,12(T + 25))} - \frac{0,0054T - 0,2}{1 + \exp(-0,1(T - 55))}. \quad (12)$$

Исследование функции (12) показывает, что максимальное значение силы трения составляет 1,84 кГс при температуре приблизительно 31,4 °C. Интегрирование (12) по всему интервалу от -200 до 100 °C и деление полученного результата на длину данного интервала температур даёт среднее значение силы трения, равное 0,853 кГс, соответственно средний коэффициент трения в этом случае равен 0,853.

Резкость сигмоидального роста силы трения по (6) зависит от значений и разности энергий активации процесса формирования и разрушения фрикционных связей. Мы предполагаем, что в данном случае энергия активации разрушения фрикционных связей превышает энергию активации их образования у обоих материалов. У каучука СКС-50 разность энергий

активации меньше. Наличие экстремума и снижения силы трения можно связать с уменьшением среднего расстояния между неровностями l_r , обусловленным сближением поверхностей с ростом температуры и, при этом, уменьшением деформационной составляющей сдвигового сопротивления.

В результате проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. Реализован анализ математической модели трения, разработанной на основе молекулярно-кинетических представлений, и предложено её приближение, удобное для аппроксимации экспериментальных данных.

2. Разработана математическая модель, учитывающая отклонения от молекулярно-кинетической модели трения для случая трения каучуков по стальной поверхности.

3. Проведённый анализ экспериментальных результатов показывает справедливость предложенной формулы (10), описывающей зависимость силы трения от температуры при фрикционном взаимодействии каучуков со стальной поверхностью.

4. В разработанной математической модели введены новые триботехнические характеристики, которые позволяют более детально охарактеризовать фрикционное взаимодействие в системе «металл-каучук».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Розов Ю.Г. Влияние характера распределения температур в объеме трубной заготовки на неоднородность поля сопротивления деформированию в операциях листовой штамповки // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 7. Ч. 2. С. 36–43.
2. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел / Н.М. Михин; АН СССР, Науч. совет по трению и смазкам, Ин-т проблем механики. М.: Наука, 1977. 221 с.
3. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбаров. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
4. Черепанов В. А. Химическая кинетика: [учеб. пособие] / В. А. Черепанов, Т. В. Аксенова ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 132 с.
5. Буданов В.В. Химическая кинетика: учебное пособие / В.В. Буданов, О.В. Лефедова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. - Иваново, 2011. 177 с.
6. Breki A.D. Mathematical regularities of the sliding friction process of a porous material based on iron impregnated with lubricating oil with dispersed particles of fluorinated graphene / A. D. Breki, S. G. Chulkin, N. M. Dobrovolsky [et al.] // Chebyshevskii Sbornik . 2021.

Vol. 22, No. 1 (77). P. 378–389. DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-378-389.

7. **Бреки А.Д.** Математические закономерности изменения характеристик процесса трения пористого композиционного материала на основе меди, содержащего масло с частицами графена / А. Д. Бреки, С. Г. Чулкин, А. Г. Колмаков [и др.] // Чебышевский сборник. 2021. Т. 22. № 1 (77). С. 390–402. DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-390-402.

8. **Breki A.D.** Semiempirical Mathematical Models of the Pivoting Friction of ShKh15 Steel over R6M5 Steel according to the Ball–Plane Scheme with Consideration of Wear / A. D. Breki, A. E. Gvozdev, A. G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10, No. 4. P. 1008–1013. DOI 10.1134/S2075113319040075.

9. **Бартенев Г.М., Елькин А.И.** О механизме трения высокоэластичных материалов при высоких и низких температурах / Теория трения и износа: [Сборник статей] // Акад. наук СССР. Науч. совет по трению и смазкам. М.: Наука, 1965. С. 95–99.

10. **Бреки А. Д., Чулкин С.Г., Шалыгин М.Г.** Аналитическое представление зависимостей коэффициента трения от температуры при фрикционном взаимодействии стального шара с термопластами // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 6 (132). С. 27–32. DOI 10.30987/2223-4608-2022-6-27-32.

REFERENCES

1. Rozov Yu.G. The temperature distribution effect in the pipe stock volume on the heterogeneity of the deformation resistance field in sheet welding operations // Izvestiya TlSU. Technical sciences. 2013, Issue 7, part 2, pp. 36–43.

2. Mikhlin N.M. External friction of solids / N.M. Himin ; USSR Academy of Sciences, Scientific Council on friction and lubricants, Problems of mechanics institute. Moscow: Nauka, 1977, 221 p.

3. Kragelsky I.V. Basics of Calculations on Friction and Wear / I.V. Kragelsky, M.N. Dobychin, V.S. Kombalov. Moscow: Mashinostroyeniye, 1977, 526 p. (in Russian)

4. Cherepanov, V. A. Chemical kinetics: [study guide] / V. A. Cherepanov, T. V. Aksenova. Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Ural Federal University. Ekaterinburg: Ural University Publishing House, 2016. 132 p. (in Russian).

5. Budanov V.V. Chemical kinetics: textbook / V.V. Budanov, O.V. Lefedova; Ivanovo State Chemical-Technological University, Ivanovo, 2011, 177 p. (in Russian).

6. Breki A.D. Mathematical regularities of the sliding friction process of a porous material based on iron impregnated with lubricating oil with dispersed particles of fluorinated graphene / A. D. Breki, S. G. Chulkin, N. M. Dobrovolsky [et al.] // Chebyshevskii Sbornik . 2021. Vol. 22, No. 1 (77). P. 378–389. DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-378-389.

7. Breki A.D. Mathematical regularities of changes in the characteristics of the friction process of a porous composite material based on copper containing oil with graphene particles/ A. D. Breki, S. G. Chulkin, A. G. Kolmakov, et al. / Chebyshevskii Sbornik. 2021, vol.22, no. 1 (77), pp. 390–402, DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-390-402.

8. Breki A.D. Semiempirical Mathematical Models of the Pivoting Friction of ShKh15 Steel over R6M5 Steel according to the Ball–Plane Scheme with Consideration of Wear / A. D. Breki, A. E. Gvozdev, A. G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10, No. 4. P. 1008–1013. DOI 10.1134/S2075113319040075.

9. Bartenev G.M., Elkin A.I. On the mechanism of friction of highly elastic materials under high and low temperatures / Theory of friction and wear: [Collection of articles] // Academy of Sciences of the USSR. Scientific Council on friction and lubricants. Moscow: Nauka, 1965, pp. 95–99.

10. Breki A.D., Chulkin S.G., Shalygin M.G. Analytic expression of slip coefficient dependences on temperature in frictional interaction of a steel ball with thermoplastics / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 6 (132), pp. 27–32. DOI 10.30987/2223-4608-2022-6-27-32

Статья поступила в редакцию 30.12.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 08.02.2023

The article was submitted 30.12.2022; approved after reviewing 31.01.2023; assepted for publication 08.02.2023