

**О ПАРАМЕТРАХ СИЛЫ ТРЕНИЯ
И ИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ**© Гусев А.Ф., Измайлов В.В.,
Новоселова М.В., 2024

Аннотация. Экспериментально определены фрикционные характеристики пяти пар трения металлических электроконтактных материалов при температурах от 20 до 150 °С. Показано преимущество выражения силы трения двучленным законом Кулона перед одночленным законом Амонтона. Определены параметры силы трения по Кулону и их температурные зависимости, а также удельной силы трения, аналогичные параметрам силы трения по Кулону, их температурные зависимости.

Ключевые слова: трение, закон Амонтона, закон Кулона, фрикционные параметры, температурные зависимости, корреляция.

**ON FRICTION FORCE PARAMETERS
AND THEIR TEMPERATURE DEPENDENCIES**

Abstract. The friction characteristics of five friction pairs of metal electrical contact materials were experimentally determined at temperatures from 20 to 150 °C. The advantage of the friction force description by Coulomb's two-term law over Amontons' one-term law is shown. The parameters of the Coulomb friction force and their temperature dependences were determined. The parameters of the specific friction force, similar to the parameters of the Coulomb friction force, and their temperature dependences were also determined.

Keywords: friction, Amontons' law, Coulomb's law, friction parameters, temperature dependences, correlation.

Введение

Сложный по своей природе процесс трения скольжения описывается двумя простыми по форме эмпирическими уравнениями [1–3]:

законом Амонтона:

$$F = fN, \quad (1)$$

законом Кулона:

$$F = F_0 + f_c N, \quad (2)$$

где F – сила трения скольжения; N – нормальная контактная нагрузка; f – коэффициент трения по Амонтону; F_0 – сила трения при $N = 0$; f_c – коэффициент трения по Кулону.

Обычно в качестве основного закона трения скольжения используется уравнение (1), возможно, в силу его простоты и того, что

именно на основании этого уравнения ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения» определяет коэффициент трения как отношение силы трения F к силе нормального давления N : $f = F / N$. Недостатком закона Амонтона как основного закона трения скольжения является то, что величина коэффициента трения f в большинстве случаев непостоянна для данной пары трения и зависит от нормальной нагрузки N . В диапазоне рабочих нагрузок фрикционного соединения коэффициент трения может изменяться в несколько раз. Это обстоятельство сводит на нет информативную ценность этой характеристики, так как ее невозможно использовать в конструкторских расчетах как константу для данного узла в отличие, например, от коэффициента жесткости в законе Гука для упругих систем или электрического сопротивления в законе Ома для линейных электрических цепей.

Более сложное двучленное выражение (2), выражающее закон трения Кулона, имеет то преимущество, что коэффициент трения f_C не зависит от нагрузки и является константой для данной пары трения в данных условиях эксплуатации [4]. Параметр F_0 обычно связывают с адгезионным взаимодействием компонентов пары трения.

Аналогом уравнения (2) является известное двучленное выражение для предела прочности фрикционного контакта на сдвиг (критического напряжения сдвига) [2, 3]:

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r, \quad (3)$$

где τ – удельная сила трения (сила трения, отнесенная к величине фактической площади контакта); p_r – фактическое контактное давление; τ_0 – величина удельной силы трения при $p_r = 0$; β – пьезокоэффициент.

Величину τ_0 (так же, как F_0) связывают с адгезионным взаимодействием контактирующих тел.

Одним из распространенных в современных технических устройствах видов фрикционных узлов, к надежности которых предъявляются жесткие требования, выступают электрические контакты [5, 6]. Эти требования связаны с необходимостью обеспечить, наряду с высокими фрикционными свойствами, лучшую проводимость контактных соединений.

Негативное воздействие на надежность скользящих электрических контактов оказывает температура. В связи с этим экспериментальные исследования влияния температуры на фрикционные и электрические параметры токопроводящих узлов трения имеют важное значение для повышения надежности и эффективности узлов.

Обстоятельные исследования воздействия температуры на фрикционные характеристики, в том числе на параметры удельной силы трения τ_0 и β , выполнены Л.Ш. Шустером [7]. Однако они ограничены специфическим классом материалов – жаропрочными сталями и твердыми

сплавами – и диапазоном температур (в основном выше 500 °С), нехарактерным для электроконтактных соединений.

Влияние температуры на электрические характеристики контактных соединений изучено в работе [8]. Целью данной работы являлось экспериментальное исследование фрикционных параметров типичных электроконтактных материалов и их температурных зависимостей.

Образцы и методика эксперимента

Исследованы образцы пяти распространенных электроконтактных материалов: серебра (99,99 % Ag), меди М1, латуни ЛС59-1, алюминия АД1 и алюминиевого сплава АД31. Физико-механические свойства исследованных материалов приведены в табл. 1. Контртелом во всех экспериментах служил зонд из сплава ПдВ20 (80 % Pd и 20 % W) с микротвердостью $H = 2\,200$ МПа, контактирующая поверхность которого имела форму эллипсоида с главными радиусами кривизны 0,5 и 3 мм. Форм образцов – прямоугольник с размерами 30 × 12 × 5 мм. Рабочая поверхность с размерами 30 × 12 мм имела шероховатость $Ra = 0,22\text{--}0,30$ мкм.

Таблица 1. Свойства исследованных материалов

Свойства	Материал				
	Серебро	Медь	Латунь ЛС59-1	Алюминий	Сплав АД31
Микротвердость, МПа	880	1 200	2 000	360	590
Модуль упругости, ГПа	70	130	105	70	71
Коэффициент Пуассона	0,38	0,34	0,33	0,32	0,34

Для измерения силы трения в контакте зонда с исследуемым образцом использовали микротрибометр [9], модернизированный для целей эксперимента: образец помещался в электронагреватель, который обеспечивал требуемую температуру с точностью ± 5 °С. Температуру измеряли с помощью хромель-копелевой термопары, закрепленной в образце в непосредственной близости от поверхности трения. Перед измерениями параметров трения при повышенной температуре образцы предварительно выдерживали в термостате при данной температуре в течение 5 ч.

Результаты и их обсуждение

Коэффициенты трения по Амонтону (см. уравнение (1)) исследованных образцов представлены на рис. 1 и 2 в зависимости от нормальной нагрузки. Как и следовало ожидать, коэффициент трения, определенный по формуле (1) как отношение силы трения к нормальной нагрузке, зависит от величины последней. В исследованном диапазоне нагрузок коэффициент трения изменяется в 1,5–2 раза.

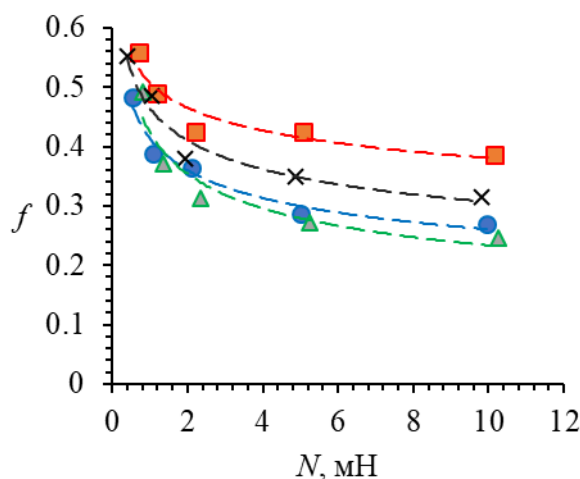


Рис. 1. Коэффициент трения по Амонтону для различных материалов в зависимости от нормальной нагрузки при 150 °С: ● – серебра; ■ – меди; ▲ – латуни; × – сплава АД31

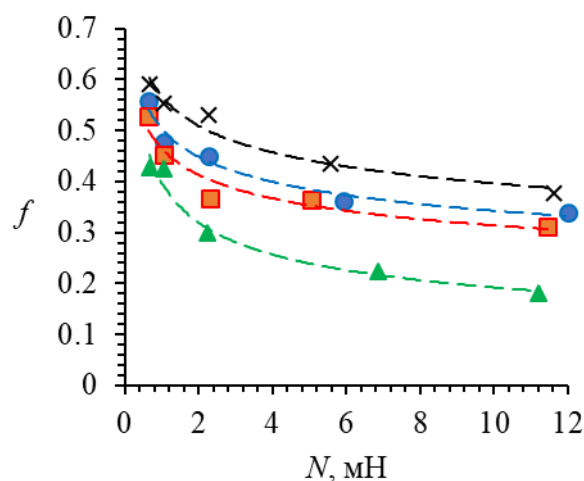


Рис. 2. Коэффициент трения по Амонтону для алюминия в зависимости от нормальной нагрузки при температуре: ● – 20 °С; ■ – 50 °С; ▲ – 100 °С; × – 150 °С

Эксперименты показали, что в отличие от коэффициента трения по Амонтону коэффициент трения по Кулону, определенный на основании уравнения (2), от нормальной нагрузки не зависит. Доказательством служат рис. 3 и 4, на которых представлены зависимости силы трения от нормальной силы. Хорошо видно, что зависимости эти носят линейный характер. Обработка экспериментальных данных по методу наименьших квадратов показала, что все приведенные на рис. 3 и 4 зависимости хорошо описываются уравнением (2) с параметрами, приведенными в табл. 2 и 3. Линейные аппроксимации зависимостей $F(N)$, представленные на рис. 3 и 4, характеризуются высокими значениями коэффициентов корреляции (не менее 0,99).

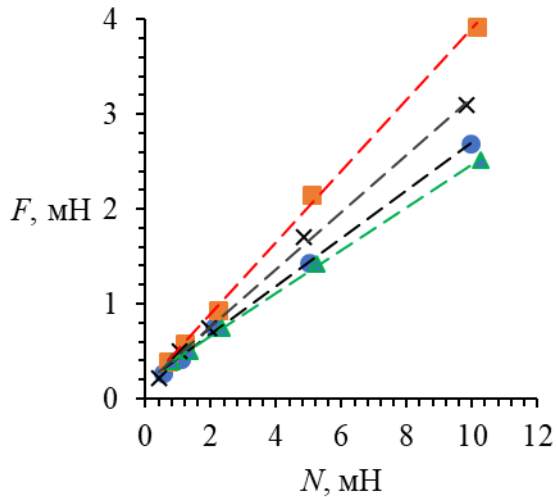


Рис. 3. Зависимость силы трения от нормальной нагрузки для различных материалов при 150 °С: ● – серебра; ■ – меди; ▲ – латуни; × – сплава АД31

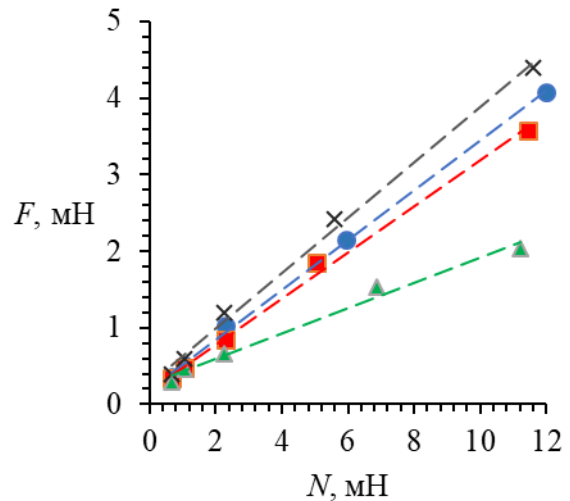


Рис. 4. Зависимость силы трения от нормальной нагрузки для алюминия при температуре: ● – 20 °С; ■ – 50 °С; ▲ – 100 °С; × – 150 °С

Таблица 2. Параметры силы трения для различных материалов при 150 °С

Материал	F_0 , мН	f_c
Серебро	0,16	0,25
Медь	0,14	0,38
Латунь	0,21	0,22
Сплав АД31	0,16	0,30

Таблица 3. Параметры силы трения для алюминия при различных температурах

Температура, °С	F_0 , мН	f_c
20	0,20	0,32
50	0,18	0,30
100	0,24	0,16
150	0,27	0,36

По измеренным значениям силы трения F при известных величинах нормальной нагрузки N можно рассчитать удельную силу трения τ и соответствующие значения фактического контактного давления p_r :

$$\tau = \frac{F}{\pi a^2}, \quad (4)$$

$$p_r = \frac{N}{\pi a^2}, \quad (5)$$

где a – радиус площадки контакта зонда с исследуемым образцом.

При малых значениях нормальной силы, прикладываемой к контакту зонда с образцом в описываемых экспериментах, деформация контактирующих тел, безусловно, носит упругий характер, поэтому радиус площадки контакта a можно рассчитать по известной формуле Г. Герца для контакта упругих тел, ограниченных поверхностью второго порядка:

$$a = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{Nr}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где r – приведенный радиус кривизны контактирующих тел; E^* – эквивалентный модуль упругости материалов контактирующих тел.

Пренебрегая шероховатостью поверхностей зонда и исследуемого образца и считая их гладкими, что является известным допущением, будем считать величину πa^2 равной фактической площади контакта в формулах (4) и (5).

Аппроксимируя экспериментальные зависимости $\tau(p_r)$ линейными уравнениями вида уравнения (3), находим значения параметров удельной силы трения τ_0 и β аналогично тому, как это сделано для параметров F_0 и f_c . Результаты представлены в табл. 4. Очевидно, что параметры F_0 и τ_0 в уравнениях (2) и (3) соответственно должны быть коррелированы, поскольку характеризуют адгезионные свойства одних и тех же материалов. Поскольку анализируемые объемы выборок невелики, воспользуемся непараметрическими методами оценки корреляции двух параметров [10, 11].

Таблица 4. Параметры удельной силы трения

Материал	Температура, °С							
	20		50		100		150	
	τ_0 , МПа	β	τ_0 , МПа	β	τ_0 , МПа	β	τ_0 , МПа	β
Серебро	63	0,28	76	0,17	54	0,15	67	0,12
Медь	80	0,24	85	0,08	67	0,10	66	0,25
Латунь	45	0,34	40	0,09	61	0,01	75	0,08
Алюминий	66	0,22	64	0,20	80	0,05	80	0,23
Сплав АД31	71	0,22	52	0,05	57	0,14	75	0,17

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена для параметров F_0 и τ_0 равен 0,7. Такая степень корреляция считается высокой. Несколько меньше величина коэффициента корреляции Кендалла (0,6), что трактуется как заметная степень корреляции. Оба коэффициента значимы на уровне $p < 0,05$.

Более того, можно провести приблизительные количественные оценки соответствия данных параметров. Очевидно, что $\tau_0 = F_0 / (\pi a_0^2)$, где a_0 – радиус контакта при $N = 0$ (напомним, что N – внешняя приложенная к контакту сжимающая нагрузка без учета силы адгезионного взаимодействия). Чтобы рассчитать радиус контакта a_0 , необходимо знать силу адгезионного притяжения контактирующих поверхностей, которая и создает площадку контакта радиусом a_0 . Непосредственное экспериментальное определение силы адгезионного притяжения сложно, но

косвенной оценкой этой величины может служить сила N_0 , рассчитанная по уравнению (2) при внешней силе $N = 0$. Величины N_0 для исследованных пар трения лежат в диапазоне $N_0 = -(0,4-1,7 \text{ мН})$ (знак «минус» означает силу отрыва), то есть сила адгезионного притяжения $N_a = -N_0$. Соответствующие значения радиуса контакта находятся в диапазоне $a_0 = 1,2-2 \text{ мкм}$, что дает при расчете диапазон значений $\tau_0 = 10-60 \text{ МПа}$. Экспериментальные значения (см. табл. 4) находятся в диапазоне $\tau_0 = 40-80 \text{ МПа}$. Учитывая приближенный характер расчетов, соответствие расчетных и экспериментальных значений можно считать удовлетворительным.

Весьма высокая степень корреляции наблюдается между параметрами f_C и β (рис. 5), о чем свидетельствуют коэффициенты корреляции Спирмена и Кендалла, равные 0,99 и 0,98 соответственно.

Из рис. 5 видно также, что значения пьезокоэффициента β меньше соответствующих значений коэффициента трения по Кулону f_C .

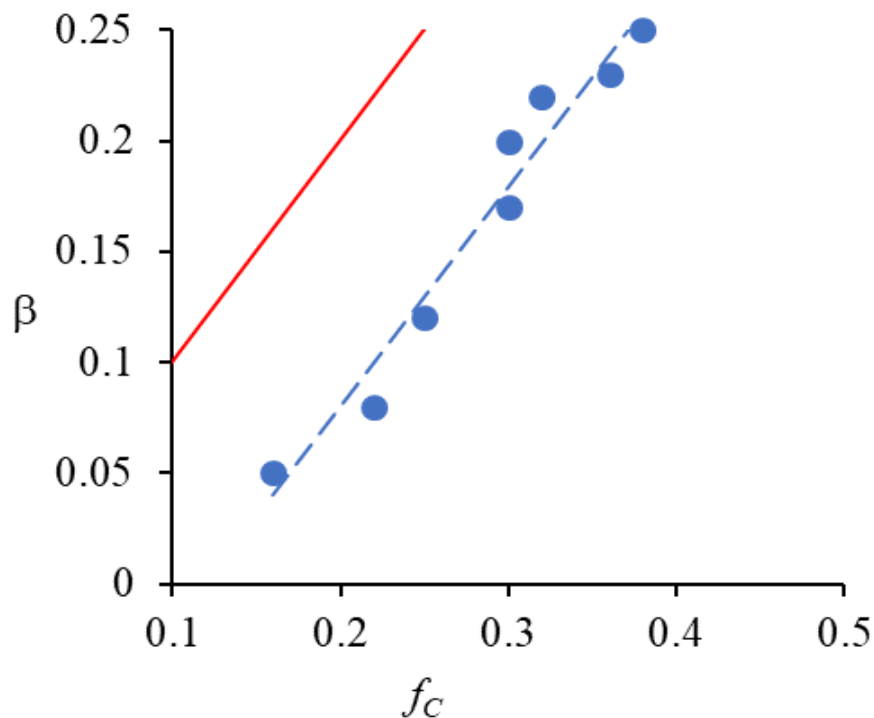


Рис. 5. Корреляция параметров f_C и β : точки – экспериментальные результаты; пунктир – аппроксимирующая зависимость; сплошная линия – $f_C = \beta$

Температурные зависимости параметров F_0 и f_C в законе Кулона для силы трения показаны на рис. 6 на примере алюминия. Аналогичные зависимости параметров удельной силы трения τ_0 и β иллюстрирует рис. 7.

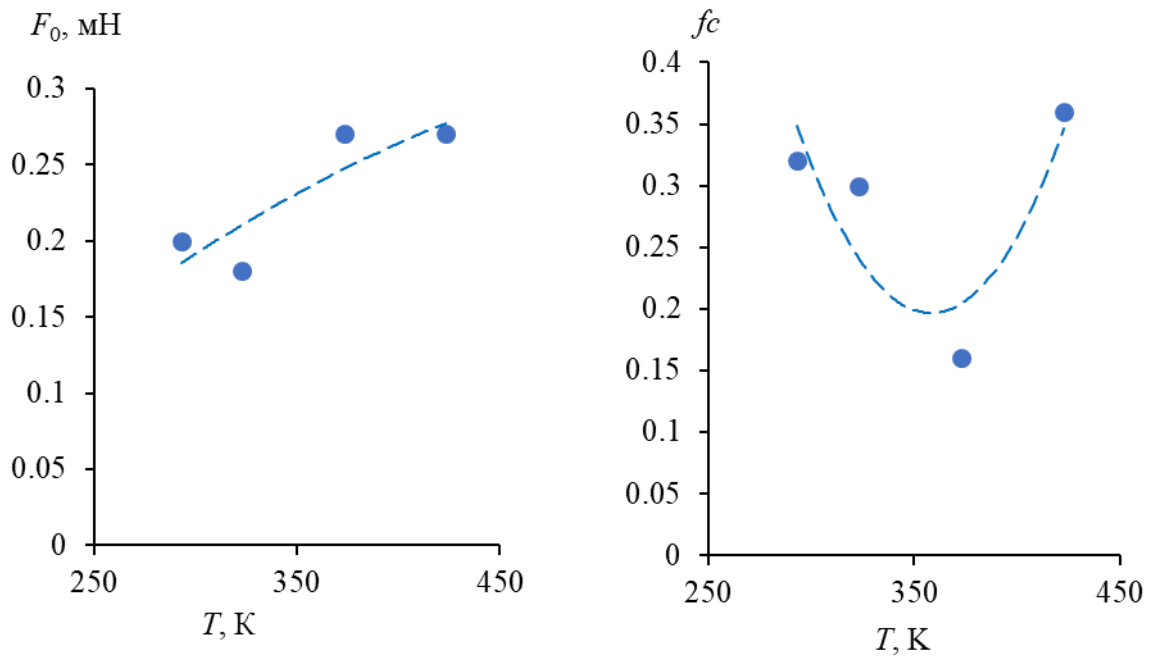


Рис. 6. Зависимость параметров силы трения от температуры:
 точки – экспериментальные значения; пунктир – аппроксимирующие зависимости

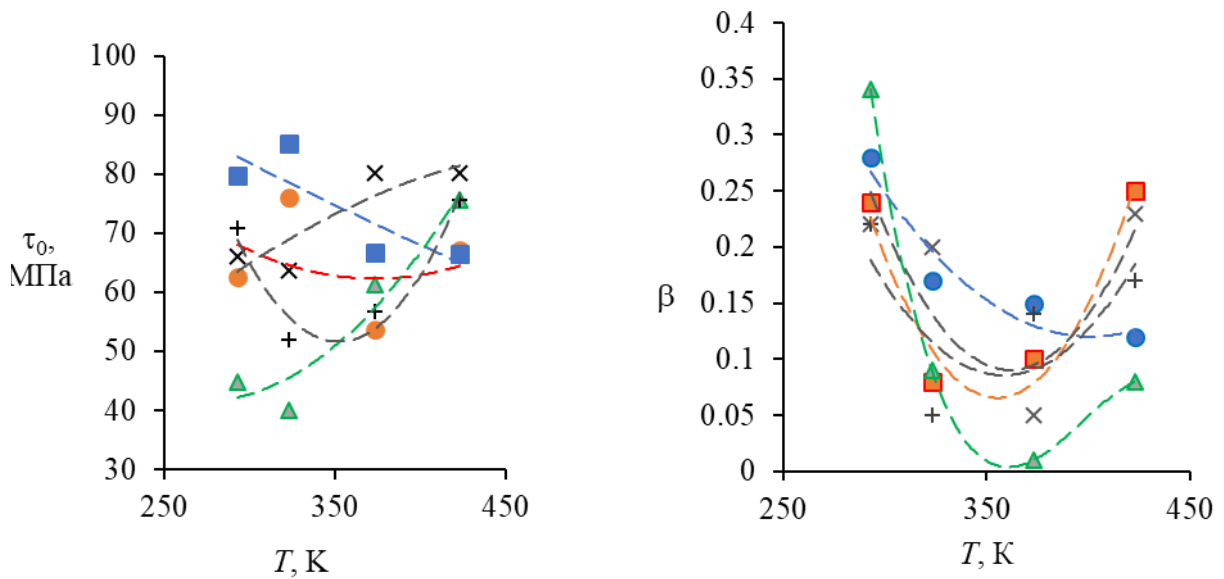


Рис. 7. Зависимость параметров удельной силы трения τ_0 и β от температуры:
 ● – серебра; ■ – меди; ▲ – латуни; × – алюминия; + – сплава АДЗ1;
 точки – экспериментальные значения; пунктир – аппроксимирующие зависимости

Параметр F_0 , характеризующий адгезионную составляющую силы трения, увеличивается с ростом температуры, тогда как коэффициент трения f_c , согласно закону Кулона, имеет немонотонную температурную зависимость с минимумом примерно при 80–100 °С.

Температурные зависимости параметра удельной силы трения τ_0 характеризуются отсутствием какой-либо четко выраженной тенденции (см. рис. 7). Для серебра величина τ_0 практически не зависит от температуры в диапазоне 20–150 °С, для меди зависимость $\tau_0(T)$ – убывающая, для алюминия – возрастающая (как и зависимость $F_0(T)$). У латунных образцов наблюдалась очень сильная возрастающая температурная зависимость параметра τ_0 . Наконец, для сплава АД31 зависимость $\tau_0(T)$ имеет немонотонный характер с минимумом при $T \approx 80$ °С.

Что касается зависимости $\beta(T)$, то она для всех исследованных материалов имеет немонотонный характер с минимумом при $T = 80$ – 100 °С, как и зависимость $f_C(T)$ (см. рис. 7). В данном диапазоне температур начинается десорбция физически адсорбированных молекул, которые всегда присутствуют на технической поверхности даже после очистки растворителями. Теплота физической адсорбции составляет от нескольких сотых до нескольких десятых электронвольт, что согласуется с указанным температурным диапазоном.

В целом наблюдаемые в экспериментах неоднозначные температурные зависимости фрикционных параметров свидетельствуют о сложном характере процессов, происходящих на поверхности металлов под воздействием температуры и связанных с образованием и разрушением физически и химически адсорбированных слоев.

Заключение

Экспериментально показано преимущество двучленного закона Кулона для силы трения скольжения твердых тел перед одночленным законом Амонтона. Коэффициент трения f_C в законе Кулона не зависит от нормальной контактной нагрузки и выступает параметром, характеризующим фрикционные свойства данной пары трения в данных условиях эксплуатации. Коэффициент трения в законе Амонтона не может служить фрикционной характеристикой данной пары трения, так как обуславливается нормальной контактной нагрузкой и варьируется с изменением последней при неизменных фрикционных свойствах контакта.

Поскольку теоретическое описание сложных физико-химических процессов, происходящих на поверхности твердых тел под воздействием температуры затруднительно, то полученные в данной работе экспериментальные результаты, касающиеся фрикционных характеристик электроконтактных материалов и их температурных зависимостей, могут найти применение при проектировании токопроводящих контактных узлов для прогнозирования их эксплуатационных характеристик.

Библиографический список

1. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2021. 236 с.
2. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
3. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.
4. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Фрикционные характеристики металлических пар трения и законы трения Амонтона и Кулона // Трение и износ. 2019. Т. 40. № 5. С. 473–478.
5. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект, 2008. 506 с.
6. Кончиц В.В., Мешков В.В., Мышкин Н.К. Триботехника электрических контактов. Минск: Наука и техника, 1986. 256 с.
7. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 200 с.
8. Измайлов В.В., Гусев А.Ф. Проводимость контактных соединений: определяющие факторы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 2 (22). С. 5–14.
9. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала: пат. 2150688 Рос. Федерация. № 98123423/28 / Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Нестерова И.Н., Иванова А.А.; заявл. 25.12.1998; опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16. 10 с.
10. Буре В.М., Парилина Е.М. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник. СПб.: Лань, 2022. 416 с.
11. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. 573 с.

УДК 621.548:621.77.04: 681.5

Д.А. Зоренко, И.П. Туляев
Тверской государственный технический университет

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ 3D-ПЕЧАТИ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

© Зоренко Д.А., Туляев И.П., 2024

Аннотация. Описаны особенности подготовки и создания деталей сложной формы из пластиков с помощью 3D-печати. Обозначены основные проблемы и сложности в обеспечении требуемой точности формы, прочностных свойств и качества поверхности. Показаны основные