

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 531.43

ФРИКЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук, В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gusevaf@mail.ru

© Гусев А.Ф., Измайлов В.В., 2024

В работе описаны результаты экспериментального исследования фрикционных и электроконтактных характеристик четырех наиболее распространенных материалов для электрических контактов. Исследования проводили на машине трения типа ГП (горизонтальная плоскость) по схеме торцевого трения одноименных материалов с коэффициентом взаимного перекрытия, стремящимся к нулю, при температурах от 20 до 150 °С. Представлены экспериментальные зависимости коэффициента трения f и контактного электрического сопротивления R в статике и при трении скольжения от температуры. Эксперименты показали, что при повышенных температурах определяющее влияние на эксплуатационные характеристики исследованных электроконтактных материалов оказывают поверхностные окисные пленки. Установлено, что результаты экспериментов находятся в хорошем соответствии с полученными ранее данными о параметрах удельной силы трения, толщине и прочности окисных пленок для изученных материалов.

Ключевые слова: трение, коэффициент трения, контактное электрическое сопротивление, температура, окисные пленки.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-3-5-11

ВВЕДЕНИЕ

Токопроводящие контактные соединения (электрические контакты) являются необходимыми и очень важными элементами в системах энергетики, устройствах автоматики, телемеханики и вычислительной техники. Их число в десятки раз превосходит число единиц других компонентов и узлов в электрических цепях и аппаратах. Особыми свойствами контактных соединений, которые делают их во многих случаях незаменимыми, являются малое сопротивление в замкнутом состоянии и практически бесконечное в разомкнутом, большая коммутируемая мощность и относительно невысокая стоимость. Вместе с тем электрические контакты – одни из наиболее уязвимых элементов, испытывающих большие силовые, коммутационные и тепловые нагрузки и подверженных износу в процессе работы. Таким образом, важно обеспечить надежность и стабильность работы электрических контактов, поскольку это определяет длительность безотказной работы электрооборудования в целом и в значительной степени влияет на безопасность работы и повышение энергоэффективности при передаче электроэнергии.

Основной эксплуатационной характеристикой узла, предназначенного для коммутации электрического тока, является контактное электрическое сопротивление (КЭС) [1–5] – сопротивление в месте перехода из одной контактной детали в другую. Завышенное КЭС в этих устройствах становится причиной значительных потерь электроэнергии, недопустимого перегрева контакт-деталей, а его тенденция к росту в процессе эксплуатации приводит к нестабильности электрических параметров. Обеспечение минимального и стабильного КЭС – это важнейшая задача при проектировании токопроводящих контактных узлов и выборе материала для контакт-деталей.

В статье [6] исследованы ключевые факторы, влияющие на одну из составляющих КЭС – сопротивление стягивания. В данной работе анализируется вторая составляющая КЭС – сопротивление поверхностных пленок потускнения. Показана их ключевая роль в КЭС типичных электроконтактных материалов, особенно при повышенных температурах.

Эксплуатационные свойства электрических контактов также во многом обуславливаются их триботехническими характеристиками. В переключающих и разъемных контактах необходимо учитывать усилие расчленения контакта, которое зависит от сил трения. Для скользящих контактов всех типов фрикционное взаимодействие является одним из основных факторов, определяющих их работоспособность. Наиболее сложным становится оптимальное сочетание триботехнических и электроконтактных характеристик. Электроконтактные материалы должны сочетать в себе комплекс противоречивых свойств, таких как высокая проводимость (с одной стороны) и высокая прочность и износостойкость (с другой) [7].

Наиболее высокие требования по обеспечению надежного контактирования предъявляются к материалам для контактов, работающих в условиях температурного нагрева. Температура сложным образом влияет на параметры и взаимосвязанные процессы, определяющие эксплуатационные характеристики электрического контакта: физико-механические свойства и фрикционные характеристики материалов контактов, процессы контактной ползучести и изнашивания, образования и разрушения поверхностных окисных пленок и адсорбированных слоев [8].

Задача выбора материала, обладающего необходимыми для заданных условий работы эксплуатационными свойствами, выступает одной из приоритетных при конструировании и усовершенствовании электрических контактов. В этой связи экспериментальные исследования в данной области имеют практическое значение для повышения надежности и эффективности электрических коммутирующих устройств.

Существует довольно большая номенклатура материалов для электрических контактов различного назначения. Однако основным электроконтактным металлом остается медь, так как она отличается хорошей электро- и теплопроводностью, достаточно высокой твердостью и износостойкостью, сравнительно небольшой стоимостью и отличной технологичностью. Наряду с медью используется алюминий, удельная проводимость (проводимость, отнесенная к массе металла) которого в два раза выше удельной проводимости меди. Вместе с тем недостатком алюминия являются его пониженные контактные свойства: текучесть и ползучесть металла под нагрузкой, образование на поверхности диэлектрических окисных пленок [9].

Целью настоящей работы стало сравнительное экспериментальное исследование трения и электропроводности контакта востребованных электроконтактных материалов (меди, медного сплава, алюминия и алюминиевого сплава) в одинаковых условиях при температурах от 20 до 150 °С.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Трение электроконтактных металлов и сплавов при повышенных температурах экспериментально исследовали на машине трения МПТ-1 типа ГП (горизонтальная плоскость). В экспериментах была реализована схема торцевого трения одноименных материалов с коэффициентом взаимного перекрытия, стремящимся к нулю. На рис. 1 показана принципиальная схема установки. Установка была специально модернизирована для задач исследования, что позволило параллельно с измерением силы трения (коэффициента трения) измерять переходное электрическое сопротивление в скользящем контакте образцов и осуществлять их одновременную регистрацию в ходе эксперимента.

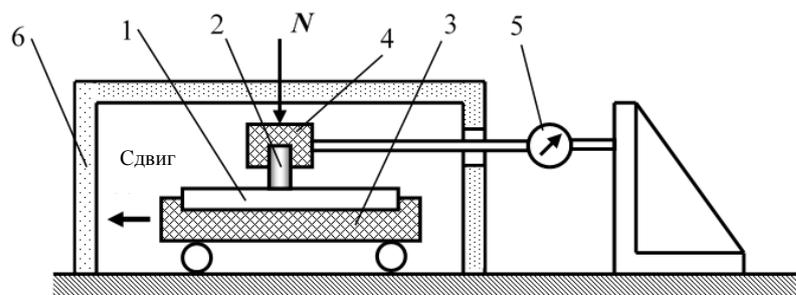


Рис. 1. Принципиальная схема машины трения МПТ-1:

1 – нижний образец; 2 – верхний образец; 3 – каретка; 4 – силоизмерительный узел; 5 – тензометрические датчики; 6 – кожух термостата; N – нормальная нагрузка

На данной установке были измерены фрикционные и электроконтактные характеристики при сдвиге и трении скольжения для четырех наиболее распространенных электроконтактных материалов: электротехнической меди марки М1; технического (кабельного) алюминия; электротехнической латуни ЛС59-1 и алюминиевого сплава АД31. Нижние образцы были изготовлены в виде полос размером $150 \times 15 \times 10$ мм, верхние – в виде цилиндров размером $\varnothing 5 \times 10$ мм. Контактные поверхности образцов после фрезерования шлифовали на абразивной бумаге до шероховатости порядка $Ra = 0,1 \dots 0,12$ мкм. Перед измерениями поверхности образцов механически очищали от окисных пленок, промывали этиловым спиртом и вытирали насухо. Затем образцы окисляли при температуре опыта в течение 5 ч.

Измерения проводили в условиях, соответствующих типичным условиям работы реальных контактов в токопроводящих узлах электрических машин и устройств: при температурах 20, 50, 100 и 150 °С и нормальных нагрузках на контакт, обеспечивающих номинальное давление в пределах $10^6 \dots 10^7$ Па. Скорость скольжения составляла от 0,1 до 1 мм/с.

Нижние образцы (см. рис. 1) закрепляли в каретке, которая приводилась в движение по горизонтальным направляющим от реверсивного электродвигателя постоянного тока с тиристорным управлением, обеспечивающим плавное бесступенчатое регулирование скорости. Верхние образцы укрепляли в оправке силоизмерительного узла, соединенного шарнирно с упругим тензометрическим кольцом. Силу трения $F_{тр}$ измеряли непрерывно с помощью тензоусилителя и регистрирующего устройства. Нормальную нагрузку N на контакт создавали с помощью штатного набора грузов, устанавливаемых на оси оправки силоизмерительного узла. Коэффициент трения f рассчитывали как отношение силы трения $F_{тр}$ к нормальной нагрузке N : $f = F_{тр} / N$. Образцы нагревали до необходимой

температуры электронагревателями, смонтированными в каретке и подъемном теплозащитном колпаке. Объемную температуру образцов измеряли и поддерживали с погрешностью ± 5 °С при помощи потенциометра с хромель-копелевыми термопарами.

Контактное электрическое сопротивление в статике и при трении скольжения определяли по стандартной четырехпроводной схеме (метод вольтметра – амперметра). Через контакт пропускали постоянный электрический ток, контактную разность потенциалов U_k снимали с пары электродов, закрепленных на образце (изолированном от корпуса) и контролобразце, непосредственно вблизи поверхности их контакта. Контактное электрическое сопротивление R рассчитывали как отношение контактной разности потенциалов к величине силы тока I через контакт: $R = U_k / I$. При сдвиге образцов производили синхронную регистрацию силы трения и контактной разности потенциалов. Для исключения побочного влияния термо-ЭДС на измеренные значения контактного напряжения эксперимент выполняли при двух противоположных направлениях тока через контакт.

В ходе измерения наблюдались скачки при трении, что выражалось в виде колебаний значений силы трения и контактной разности потенциалов. При анализе результатов сравнивали средние для каждого отдельного измерения значения коэффициента трения скольжения и КЭС. Экспериментальные значения на приведенных ниже графиках (рис. 2, 3) – среднеарифметическое значение и доверительный интервал, рассчитанные по результатам не менее пяти измерений при одних и тех же условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты показали, что при повышенных температурах определяющее влияние на эксплуатационные характеристики исследованных электроконтактных материалов оказывают поверхностные окисные пленки. На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов трения исследованных материалов от температуры. Кривые, отмеченные цифрой 1, – результаты эксперимента, а цифрой 2 – расчетная зависимость для окисных пленок.

Из графиков видно, что для всех исследованных электроконтактных материалов с повышением температуры от 20 °С значения коэффициента трения уменьшаются, проходят через минимум приблизительно при 70...80 °С и затем увеличиваются с той или иной степенью интенсивности. Пунктирными линиями на графиках показаны зависимости, рассчитанные для этих же металлов по значениям параметров удельной силы трения для окисных пленок, которые были определены по оригинальной методике на микротрибометре [10]. Сравнение расчетных кривых с экспериментальными данными показывает, что расчетные зависимости для окисных пленок адекватно отражают изменение коэффициента трения в зависимости от температуры для всех исследованных материалов. Коэффициент трения латунных образцов несколько выше, чем у образцов из чистой меди. Высокие значения коэффициента трения наблюдаются при температуре 150 °С для алюминиевого сплава и (в особенности) для чистого алюминия. При этом на поверхности трения наблюдаются следы схватывания, а на поверхности трения алюминиевых образцов – задиры и следы переноса материала на контролобразец. Такой результат можно объяснить сильным разрушением поверхностных окисных пленок, сравнительно тонких на латуни и менее прочных, чем при комнатной температуре, на алюминии и сплаве АД31. При задирах и схватывании разброс величин коэффициента трения увеличивается.

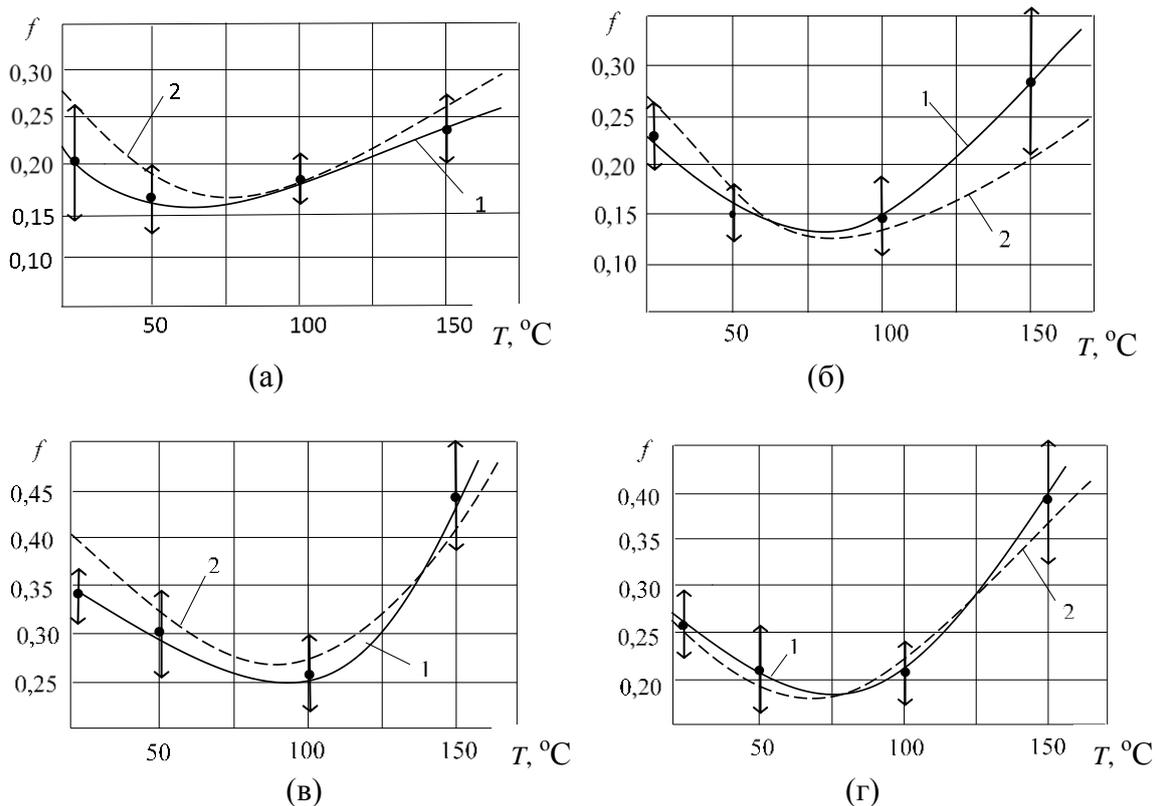


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от температуры: медных образцов (а); латунных (б); алюминиевых (в); из сплава АД31 (г)

На рис. 3 показаны зависимости КЭС от температуры в статическом контакте и при трении скольжения для исследованных электроконтактных материалов. Кривые, отмеченные цифрой 1, соответствуют неподвижному контакту, а цифрой 2 – контакту при трении скольжения.

Результаты измерений находятся в соответствии с полученными ранее данными о толщине и прочности окисных пленок [8]. На меди (рис. 3а) с ростом температуры от 20 до 150 $^{\circ}\text{C}$ значение КЭС возрастает на два порядка в статическом контакте и почти в 20 раз в скользящем. Это однозначно объясняется ростом толщины и прочности поверхностной окисной пленки. Согласно результатам наших исследований, с увеличением температуры от 20 до 150 $^{\circ}\text{C}$ толщина пленки на меди возрастает почти в 80 раз, а нагрузка, необходимая для ее разрушения при контактном нажатии, – в 15–18 раз в статике и в 5–7 раз при сдвиге. На алюминии и алюминиевом сплаве АД31 с ростом температуры разрушение окисной пленки облегчается. Это подтверждают результаты измерения контактного сопротивления, представленные на рис. 3в и 3г. У данных материалов наблюдается убывающая зависимость КЭС от температуры. Относительно слабая зависимость КЭС от температуры для латуни (рис. 3б) объясняется примерно одинаковой прочностью окисных пленок на ее поверхности при повышенных температурах.

Относительный сдвиг контактирующих под нагрузкой поверхностей облегчает разрушение окисных пленок и приводит, как это видно на графиках (рис. 3), к снижению КЭС в скользящем контакте по сравнению со статическим. Особенно заметно это проявляется у толстых или прочных пленок, разрушение которых при статическом нагружении затруднено.

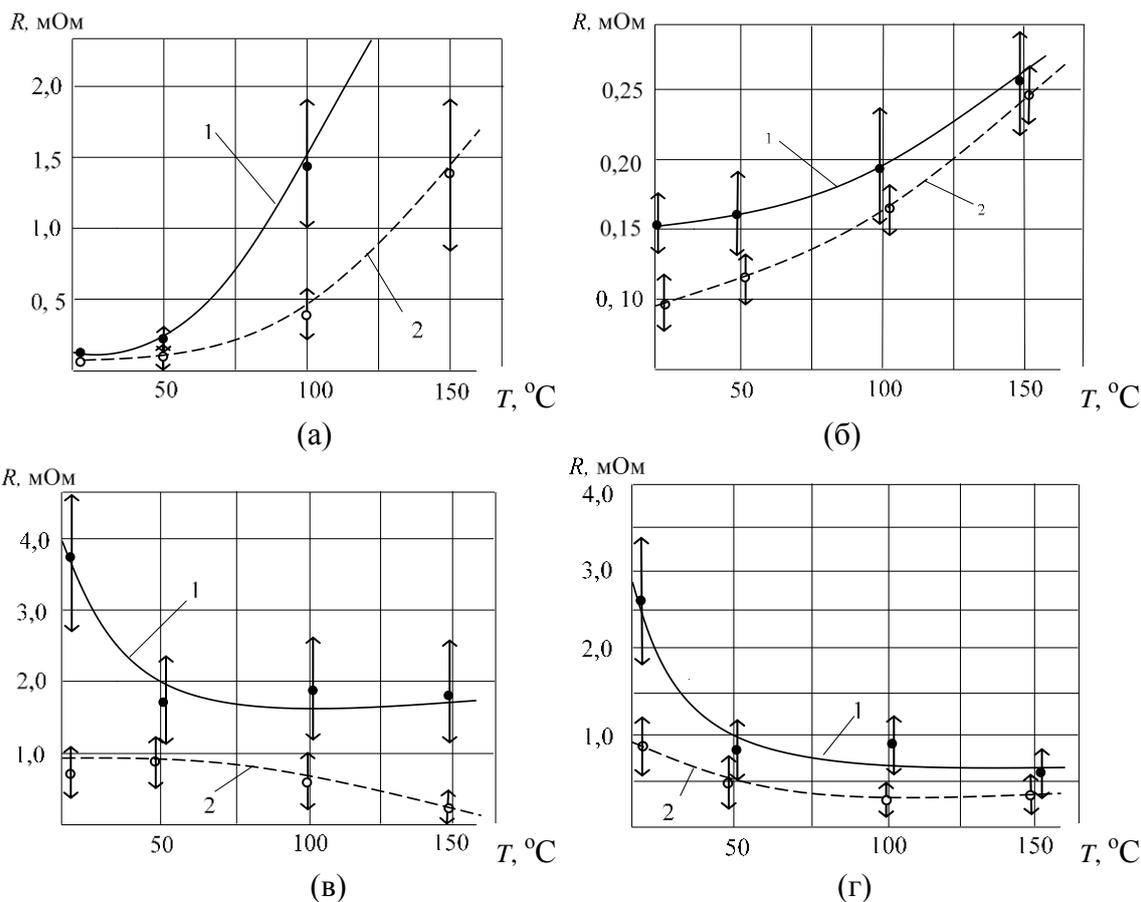


Рис. 3. Зависимость электросопротивления контакта от температуры: медных образцов (а); латунных (б); алюминиевых (в); из сплава АД31 (г)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку теоретический расчет характеристик трения и контактного электросопротивления при повышенных температурах, когда процессы образования и разрушения окисных пленок играют существенную роль, остается в целом трудной задачей, то результаты данного исследования эксплуатационных характеристик электроконтактных материалов могут найти непосредственное применение при проектировании токопроводящих контактных узлов. Вместе с тем выполненные в данной работе эксперименты показали, что результаты измерений на образцах электроконтактных материалов при повышенных температурах хорошо согласуются с изученными ранее закономерностями, характеризующими трение и разрушение окисных пленок на поверхности металлов, что позволяет использовать их для прогнозирования эксплуатационных характеристик электрических контактов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основы теории электрических аппаратов / под ред. П.А. Курбатова. СПб.: Лань. 2021. 592 с.
2. Аполлонский С.М., Куклев Ю.В., Фролов В.Я. Электрические аппараты управления и автоматики. СПб.: Лань. 2022. 256 с.
3. Electrical Contacts: Principles and Applications / ed. P.G. Slade. New York: Marcel Dekker. 1999. 1210 p.

4. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Интеллект. 2008. 506 с.

5. Хольм Р. Электрические контакты: пер. с англ. М.: Изд-во иностранной литературы. 1961. 464 с.

6. 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.

7. Кончиц В.В., Мешков В.В., Мышкин Н.К. Триботехника электрических контактов. Минск: Наука и техника. 1986. 256 с.

8. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография. Тверь: ТГТУ. 2010. 110 с.

9. Дзекцер Н.Н., Висленев Ю.С. Многоамперные контактные соединения. Л.: Энергоатомиздат. 1987. 127 с.

10. Нестерова И.Н., Гусев А.Ф. Микротрибометр – прибор для экспериментального исследования фрикционных параметров тонких поверхностных слоев и покрытий // *Трение и износ*. 1995. Т. 16. № 6. С. 1152–1158.

Для цитирования: Гусев А.Ф., Измайлов В.В. Фрикционные и электроконтактные характеристики материалов электрических контактов при повышенных температурах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 3 (23). С. 5–11.

FRICION AND ELECTRIC-CONTACT CHARACTERISTICS OF MATERIALS FOR ELECTRICAL CONNECTIONS AT ELEVATED TEMPERATURES

A.F. GUSEV, Cand. Sc., V.V. IZMAILOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: gusevaf@mail.ru

The paper describes the results of an experimental study of friction and electrical contact characteristics of the four most common materials for electrical contacts. The studies were carried out on a friction machine of the HP type (horizontal plane) according to the scheme of the end friction of the same materials with a reciprocal overlapping coefficient tending to zero at temperatures from 20 up to 150 °C. The experimental dependences of the friction coefficient f and the contact electrical resistance R on temperature in static and sliding friction are presented. Experiments have shown that at elevated temperatures surface oxide films have a decisive influence on the operational characteristics of the studied electrical contact materials. It is established that the experimental results are in good agreement with the previously obtained data on the parameters of the specific friction force, thickness and strength of oxide films for the studied materials

Keywords: friction, coefficient of friction, contact electrical resistance, temperature, oxide films.

Поступила в редакцию/received: 12.01.2024; после рецензирования/revised: 24.01.2024;
принята/accepted: 30.01.2024