

Электрический износ в паре трения токоприемник — контактный провод

В паре трения контактный провод — токосъемные пластины токоприемника имеет место износ, степень которого сложно прогнозировать. Для исследования процессов в контакте используют испытательные стенды, где предпринимают попытки определения интенсивности электрического износа через степень нагрева места контакта.

Главной задачей системы контактная сеть — токоприемник является надежная передача электрической мощности от стационарных устройств тягового электроснабжения к перемещающемуся потребителю — тяговому подвижному составу во всем диапазоне скорости движения. Процесс передачи мощности должен проходить при наличии постоянного механического и электрического контакта, т. е. непрерывно и с высокой надежностью. В то же время износ контактного провода и пластин токоприемника должен быть минимальным. Работа по передаче через скользящий контакт электрической энергии сопровождается нагревом зоны контакта, вызываемым протеканием тока и трением. Это приводит к механическому и электрическому износу провода и контактных пластин или угольных вставок (далее — контактные пластины, если их вид не конкретизирован). Обратная пропорциональная зависимость между обоими видами износа (под действием силы прижатия, с одной стороны, и в результате протекания тока, с другой) позволяет характеризовать минимизацию износа как одну из наиболее сложных технических проблем (рис. 1, 2).

Еще одной проблемой является ограниченная возможность передачи мощности через контакт во время стоянки поезда. Для того чтобы избежать чрезмерного нагрева контактной зоны, который обусловлен постоянно растущей мощностью, потребляемой вагонами из шины поездного электроснабже-

ния, необходим поиск новых решений. Эта проблема особо актуальна на линиях, электрифицированных по системе постоянного тока, где через контакт протекает большой ток при относительно низком напряжении.

Процессы, протекающие в контакте

Для решения рассмотренных проблем необходим детализированный анализ процессов, протекающих в контакте между проводом и контактной пластиной. Как уже отмечалось, при протекании тока через скользящий контакт образующееся тепло вызывает электрический износ. В то же время тепло, выделяемое в результате работы сил трения, становится причиной механического износа (рис. 3).

На скользящий контакт воздействуют следующие внешние факторы: сила прижатия, скорость движения, длительность импульсов изменения силы нажатия и температура. Сила прижатия является связующим параметром между двумя колебательными системами: контактной подвеской и токоприемником. Речь идет о двух самостоятельных системах, склонных к переходу в колебательное состояние. Сила прижатия в контакте является основным фактором качества токосъема при оценке взаимодействия контактной подвески с токоприемником. Кроме конструкции подвески и токоприемника, на силу прижатия большое влияние оказывает также скорость дви-

жения. От нее существенно зависит длительность импульсов изменения силы нажатия. В этом отношении режим, возникающий во время остановки (стоянки) поезда, представляет собой экстремальный случай.

В результате разнообразия относительных перемещений контактного провода и пластин токоприемника скорость движения оказывает столь же многостороннее влияние на процессы в контакте. В результате нагрева зоны контакта прежде всего повышается температура так называемого пятна контакта. Его температура является важнейшим параметром, определяющим

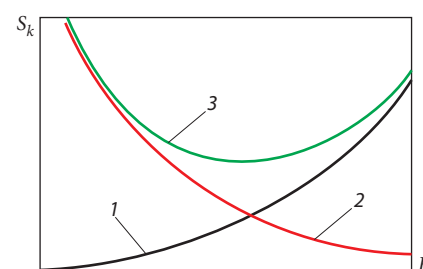


Рис. 1. Зависимость износа контактного провода от силы прижатия в контакте: S_k — износ контактного провода; F — сила прижатия токоприемника к контактному проводу; 1 — механический износ; 2 — электрический износ; 3 — суммарный износ

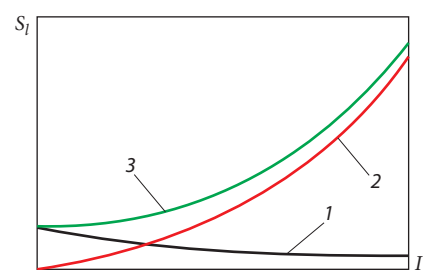


Рис. 2. Зависимость износа контактных пластин от тока, протекающего через контакт: S_l — износ контактных пластин; I — ток, протекающий через контакт; 1 — механический износ; 2 — электрический износ; 3 — суммарный износ

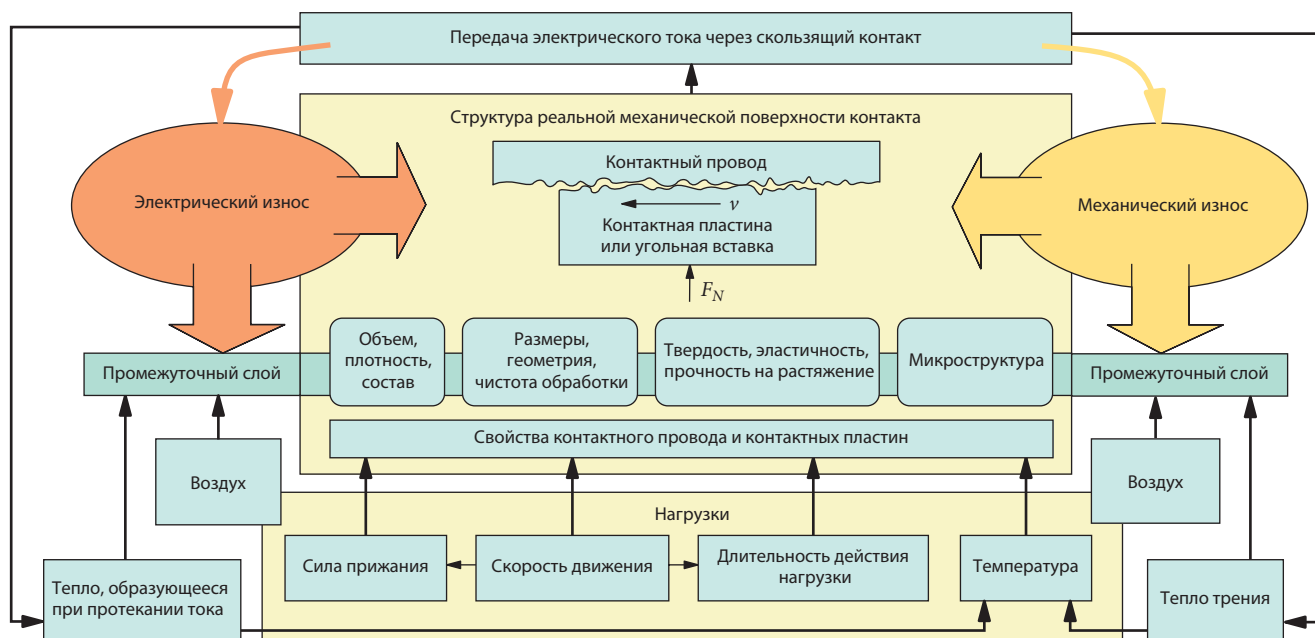


Рис. 3. Процессы и взаимосвязи в контакте:
 v — скорость и направление движения; F_N — сила прижатия

физические и химические процессы в скользящем контакте. Это реальное механическое пятно контакта является основным элементом при рассмотрении взаимодействия контактного провода и токоприемника. Структура пятна определяется физическими и химическими свойствами материалов контактного провода и пластин токоприемника. К этим свойствам относятся общие характеристики контакта, такие, как объем, плотность и состав контактирующих материалов. Поверхности, находящиеся в контакте, характеризуют размерами и геометрией, а также классом чистоты

обработки. Кроме того, учитывают механические характеристики контактирующих материалов.

Важное значение при оценке контактного пятна имеет так называемый промежуточный слой. В настоящее время для изготовления контактного провода используют чистую или низколегированную медь, которая склонна к быстрому поверхностному окислению. В результате на проводе образуется промежуточный слой. Если в токоприемнике используются угольные вставки, промежуточный слой не образуется.

Возникновение промежуточного слоя обусловлено не только

окислением, происходящим под действием окружающей атмосферы, но также и сульфатированием, вызываемым выхлопными газами тепловозов. Таким образом, промежуточный слой, который называют также патиной, образован окисью меди CuO , закисью меди Cu_2O и в небольшой степени сульфатом меди Cu_2SO_4 . Кроме того, в материале промежуточного слоя имеются включения графита и пыли. Этот слой обеспечивает хорошие условия скольжения контактных пластин по рабочей поверхности провода. Его коэффициент трения значительно ниже, чем чистой меди, что положительно сказывается на уменьшении износа контактных пластин. В то же время он имеет повышенное электрическое сопротивление, так как окислы меди по своей природе являются полупроводниковыми материалами.

При описании процесса образования промежуточного слоя следует отметить, что он испытывает механическую нагрузку (полирование) при каждом проходе токоприемника. При определенных атмосферных условиях на контактирующих поверхностях может образовываться водяная пленка или слой гололеда. Однако, казалось бы, при идеальных

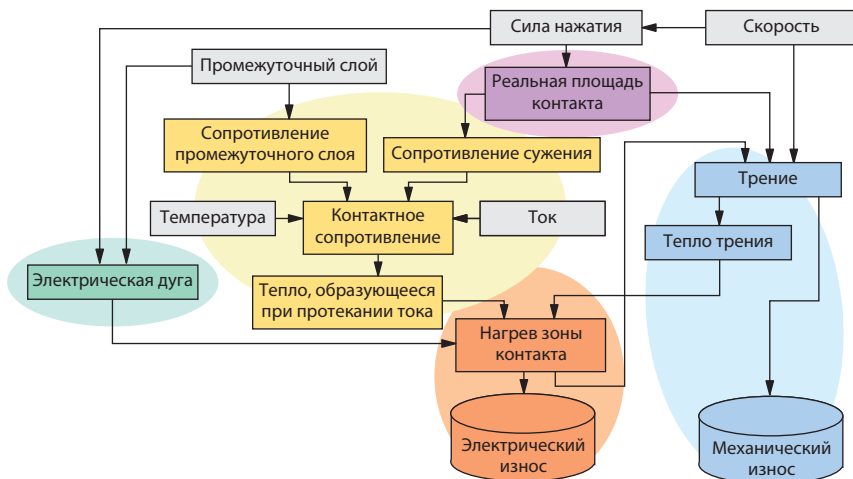


Рис. 4. Упрощенная картина взаимосвязей при механическом и электрическом износе

погодных условиях на поверхности контактного провода все равно образуется водяная пленка из влаги, содержащейся в воздухе. Эта пленка играет чрезвычайно важную роль как смазывающее средство. Основные зависимости сложного и многостороннего процесса взаимодействия контактного провода и пластин отражены в рис. 4.

Сила прижатия в большой степени зависит от скорости движения. В свою очередь, величина и состояние контактного пятна зависят от силы прижатия. Поскольку на практике идеально гладких поверхностей не существует, контакт реализуется не на всей площади соприкасающихся поверхностей, а лишь в нескольких точках. Суммарная площадь этих точек является реальной контактной поверхностью. Как видно из рис. 5, не все эти точки участвуют в передаче тока, в результате чего возникает сопротивление, которое называют переходным сопротивлением контакта при сужении поверхности контактирования, или сопротивлением сужения. Токпроводящие точки получили название токовых мостиков. Таким образом, сопротивление контакта образовано двумя составляющими — сопротивлением сужения и сопротивлением промежуточного слоя. Как всякое электрическое сопротивление, оно зависит от температуры. При протекании тока через контактное сопротивление зона контакта нагревается. Тепло трения вызывает дополнительное повышение температуры. Кроме того, зона контакта нагревается под действием электрической дуги, которая может возникать при уменьшении силы нажатия ниже допустимого значения, а также при наличии на проводе гололеда или инея. В результате нагрева контактной зоны токовые мостики, образовавшиеся между проводом и пластиной, оплавляются, материал испаряется или выгорает. В результате возникает электрический износ.

Тепло трения является результатом трения скольжения рассматриваемой пары. Трение приводит к

механическому износу. Исследования показали, что на тяговом подвижном составе переменного тока 80 % износа контактных пластин приходится на электрический износ и 20 % на механический. Что касается контактного провода, то на нем преобладает механический износ.

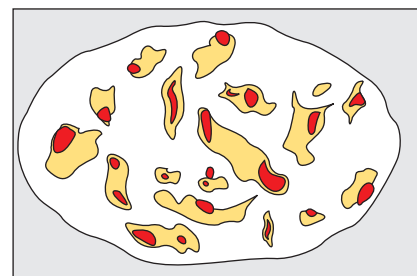
При низкой скорости механический износ невелик, поэтому основное внимание уделяется параметрам, способствующим электрическому износу. В первом приближении принимается, что провод и контактная пластина находятся в идеальном контакте, а это значит, что действие электрической дуги не учитывается.

В режиме безотказной работы без учета действия электрической дуги главная роль в образовании электрического износа принадлежит контактному сопротивлению (см. рис. 4). Если его величина для различных граничных условий известна, можно сделать вывод о степени нагрева зоны контакта. Это позволяет прогнозировать степень электрического износа.

Определение контактного сопротивления

Испытательный стенд. Контактное сопротивление между проводом и пластиной рассчитать сложно из-за большого числа неопределенностей в отношении реальной площади контакта и характеристик промежуточного слоя. В связи с этим предпочтение было отдано измерительным методам определения контактного сопротивления. С этой целью в институте электрических транспортных систем в Дрездене был создан испытательный стенд при поддержке компании Siemens Transportation Systems.

Стенд позволяет устанавливать контактные провода и контактные пластины разных типов. Это дает возможность исследовать взаимодействие в парах трения, компоненты которых состоят из разных материалов и обуславливают разную степень износа. На стенд



- Общая поверхность контакта
- Механическая поверхность соприкосновения
- Площадь электрического контакта

Рис. 5. Видимая и реальная площади контакта

можно подавать напряжение питания постоянного и переменного (с частотой 16,7 Гц) тока. При этом рабочий ток можно менять от 0 до 500 А. Минимальная сила прижатия, реализуемая на стенде, составляет 20 Н. Контактное сопротивление может быть измерено как в режиме стоянки, так и при моделировании движения со скоростью до 10 м/с. На перспективу предусмотрено оснащение стенда системой нагрева провода, которая позволит нагревать контактный провод до максимально допустимой в эксплуатации температуры 80 °С. Конструкция стенда дает возможность регулировать интервалы времени между проходами токоприемника, позволяет регенерировать патину контактного провода и учитывать ее влияние на контактное сопротивление. Ниже приведен перечень регулируемых параметров стенда.

Основу стенда составляет участок контактной подвески в виде токовой шины длиной 12 м. Она служит для крепления на ней испытываемого контактного провода и одновременно используется в качестве ходового рельса для перемещения измерительной каретки. Система смонтирована на стальной балке. Движущаяся измерительная каретка перемещает по поверхности испытываемого контактного провода отрезок контактной пластины длиной 75 мм.

Привод и торможение каретки осуществляются асинхронным двигателем, питающимся от преобразователя. Двигатель связан с кареткой бесконечным тросом. Рабочее на-

Изменяемые параметры измерительного стенда

Пара трения	Материал / степень износа
Род тока	Постоянный, переменный с частотами 16,7 и 50 Гц
Величина тока, А	0 – 500
Сила прижатия, Н	20 – 200
Скорость движения, м/с	0 – 10
Температура контактного провода, °С	20 – 80 (в перспективе)

пряжение подводится через специальные цепи электроснабжения, выполняющие также функции вывода измерительного сигнала. Для этой цели служит особо гибкий кабель. Величину силы нажатия пластины на контактный провод регулируют с помощью грузов. Это выполняется с помощью пантографической конструкции, позволяющей манипулировать контактной пластиной, площадкой для грузов и самими грузами, а также обеспечивающей развязку между силой прижатия и массой измерительной каретки. В целях безопасности вся испытательная установка закрыта решеткой.

Измеряемые величины. Расположение измерительных датчиков показано на рис. 6. Атмосферное давление, температуру и влажность воздуха измеряют в непосредственной близости от стенда. При этом дополнительно определяют температуру на контактном проводе и в двух точках контактной пластины. Ток, протекающий через контакт, подается от мощного транс-

форматора. Величину тока, которая может достигать 500 А, измеряют с помощью трансформатора тока, включенного в первичную обмотку силового трансформатора.

На контактной пластине измеряют два потенциала. По отношению к контактному проводу, связанному в данном эксперименте с массой, измеряют контактное напряжение. Дополнительно определяют напряжение между контактным проводом и оправкой, в которой закреплена пластина. Последнее выполняют с целью определения сопротивления растекания для графита, если вместо контактной пластины используется угольная вставка. По измеренным значениям контактного напряжения и тока, протекающего через контакт, в ходе измерений рассчитывается величина контактного сопротивления.

Измерительный стенд дает возможность воспринимать вертикально действующую на контакт нагрузку, моделирующую силу прижатия, и продольно действующую силу трения. Для измерения пути и скорости используется импульсный вращающийся датчик. Он измеряет частоту вращения шкива каретки с тяговым тросом, по величине которой в непрерывном режиме определяется линейная скорость движения.

Определение контактного сопротивления. На стенде выполняют множество измерений, в ходе которых изменяют следующие параметры:

- материал пары трения;
- степень износа провода и пластины;
- род и величина тока;
- сила прижатия;
- скорость;
- продолжительность пауз, за которые происходит регенерация промежуточного слоя.

Для оценки результатов измерений сначала выбирают последовательность точек измерений, которые были выполнены в состоянии покоя, т. е. при неподвижном контакте. Для этого исследования брали новый контактный провод марки Ri 107 из электролитической меди и отрезок угольной вставки из графита марки ВН424 производства компании Schunk Kohlenstofftechnik. Этот материал имеет удельное электрическое сопротивление, равное 35 мкОм·м. Характеристики угольных вставок соответствуют стандарту, принятому для них на железных дорогах Германии (DBAG), и имеют ширину контактной поверхности 35 мм. Новая вставка по сравнению с изношенной имеет более шероховатую контактную поверхность. При выполнении этого исследования на контакт подают переменный ток частотой 50 Гц.

На рис. 7 показано изменение контактного сопротивления в зависимости от протекающего тока при различных значениях силы прижатия. Сила 20 кН, приходящаяся на одну угольную вставку, является минимальным динамическим усилием прижатия согласно стандарту prEN 50367:2003, что для электроподвижного состава однофазного переменного тока соответствует 40 Н на один токоприемник. Ток, пропускаемый через контакт, изменяют ступенями по 15 А. При этом следят за тем, чтобы температура нагрева контактного провода в длительном режиме не превышала 80 °С. В связи с этим измерения с силой прижатия 20 Н проводили при величинах тока, не превышавших 90 А. Большие токи при этой величине силы прижатия приводят к чрезмерному нагреву контактного провода.

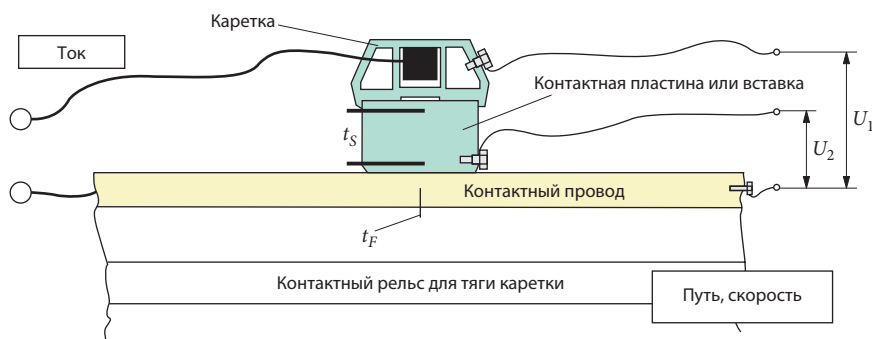


Рис. 6. Принципиальная схема измерений на стенде:

U_1 — напряжение между контактным проводом и оправкой с закрепленной контактной пластиной; U_2 — контактное напряжение; t_s — температура контактной пластины или угольной вставки; t_f — температура контактного провода

Анализ результатов, приведенных на рис. 7, показывает, что при неизменной силе прижатия контактное сопротивление с увеличением тока уменьшается. С другой стороны, при неизменной величине тока контактное сопротивление падает с увеличением силы прижатия. При этом его величина приближается к минимальному значению, которое при новых графитовых вставках составляет приблизительно 0,06 Ом. Из рис. 7 также видно, что с увеличением тока, протекающего через контакт, влияние силы нажатия ослабевает. При больших значениях силы нажатия влияние тока на величину контактного сопротивления также незначительно. Этот пример показывает, что при оценке контактного сопротивления нельзя рассматривать влияние отдельных параметров, а следует учитывать роль всех влияющих факторов.

В рамках проводившихся измерений наряду с новыми и имеющими эксплуатационный износ угольными вставками ВН424 исследовали также вставки с износом производства компании Pan Trac (PT 5082). Минимальная величина контактного сопротивления вставок с износом снижается до 4 мОм. При использовании новых угольных вставок с медной пропиткой минимальное контактное сопротивление падает до 2,6 мОм. Согласно данным изготовителя, этот материал имеет удельное электрическое сопротивление всего лишь 3 мкОм·м.

Таким образом, ток, протекающий через контакт, и сила прижатия в наибольшей степени влияют на величину контактного сопротивления, а следовательно, и на степень нагрева зоны контакта. В противоположность этому род тока (постоянный или переменный частотой 50 Гц) при прочих равных условиях заметного влияния не оказывает. Существенная разница между новыми угольными вставками и имеющими износ определяется степенью шероховатости поверхностей. Гладкая поверхность вставки с износом обеспечивает снижение кон-

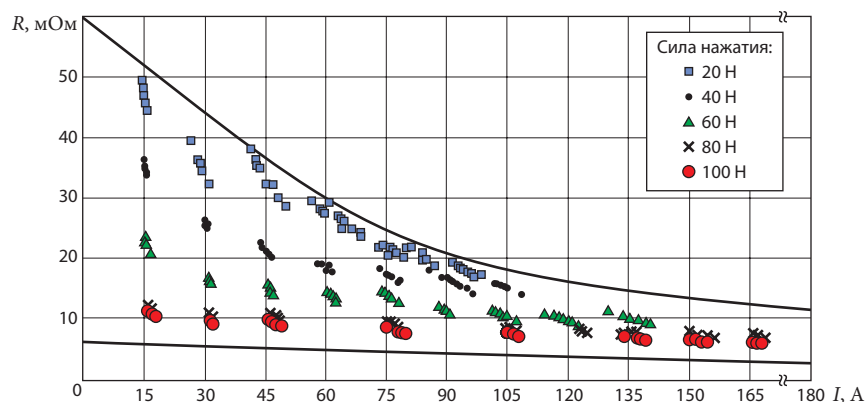


Рис. 7. Зависимость контактного сопротивления от тока и силы нажатия: R — сопротивление; I — ток

тактного сопротивления. Кроме того, как и следовало ожидать, контактное сопротивление для вставки с медной пропиткой оказалось значительно ниже, чем у вставки без пропитки. Однако разница не столь велика, как ожидалось при сравнении удельных сопротивлений (35 мкОм·м без пропитки, 3 мкОм·м с медной пропиткой).

Цель измерений с движущейся кареткой состояла в том, чтобы исследовать изменение условий в скользящем контакте. Эти испытания предусматривают лишь кратковременное нагружение контакта в зависимости от скорости движения. В противоположность этому при измерении в режиме стоянки исходят из стационарных нагрузок. С помощью измерений, выполненных в движении, можно подтвердить эмпирические зависимости, касающиеся контактного сопротивления, уже полученные при испытаниях в режиме стоянки.

Изменение контактного сопротивления между новым проводом и угольной вставкой с износом в зависимости от скорости движения для разных значений тока показано на рис. 8. Рассматривались скорости 0,5, 2, 4 и 10 м/с. Дополнительно даны результаты, полученные в режиме стоянки, т. е. при скорости 0 м/с. Как видно из рисунка, при сравнительно небольших величинах скорости контактное сопротивление меняется в небольшой степени. В связи с этим наблюдаются значительные различия между про-

жимами движения и стоянки. При движении очевидным является отсутствие равномерного распределения силы прижатия по ширине контактной вставки. Поскольку каждая из угольных вставок имеет индивидуальное поддресорирование, их воздействие на контактный провод различно. В результате из-за меняющейся величины отжатия контактного провода он лишь в редких случаях будет равномерно прилегать по всей ширине вставки.

Расчет нагрева зоны контакта

Если контактное сопротивление известно для разных граничных условий, на его основе можно определить нагрев зоны контакта. Параметром, в наибольшей степени определяющим электрический износ, является температура контактных точек или токовых мостиков, так как они изнашиваются в первую очередь. В связи с тем что величина токовых мостиков слишком мала и составляет несколько микрон, измерить температуру непосредственно на них невозможно.

Основой для расчета температуры является баланс тепла в зоне контакта. Для его получения потребовалось сформировать специальную модель, включающую в себя площадь контакта, а также действующие в нем электрическое и термическое поля. Если контакт неподвижен, можно исходить из одного стационарного состояния. В этом

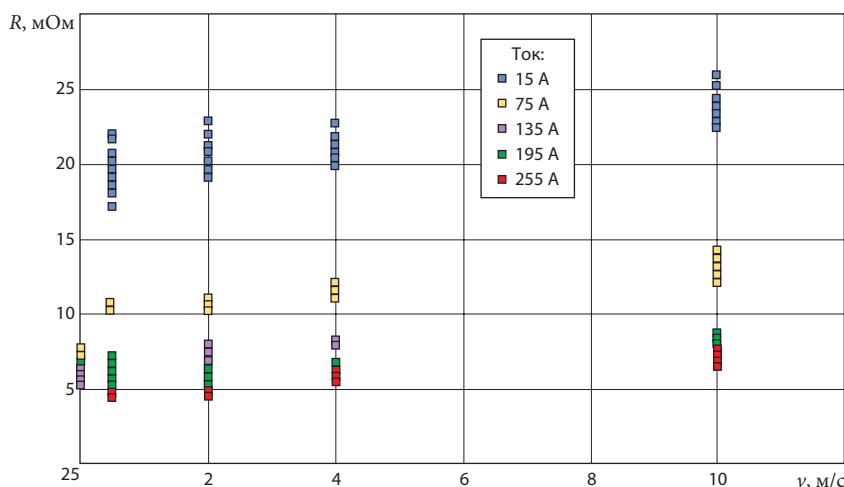


Рис. 8. Зависимость между контактным сопротивлением и скоростью движения: R — сопротивление; v — скорость движения

случае имеет место равенство количества тепла, образующегося в результате протекания электрического тока и отводимого за счет теплопроводности материалов контакта. Если исходить из того, что электрическое и термическое поля внутри контакта имеют одинаковый характер, можно написать следующее простое выражение:

$$\frac{1}{8} U_K^2 = \rho \lambda \Delta T.$$

Из этого уравнения следует, что величина падения напряжения в контакте U_K , возведенная в квадрат, пропорциональна разности температур токового мостика и базовой точки, не связанной с влиянием сопротивления контакта. Коэффициентами пропорциональности являются удельное электрическое сопротивление ρ и теплопроводность λ соответствующих материалов контакта. Это выражение справедливо для неподвижных симметричных контактов, т.е. таких, в которых оба контактирующих элемента состоят из одного и того же материала. В частности, оно может быть применено к электроподвижному составу постоянного тока с медными контактными пластинами токоприемника, прижатого к медному контактному проводу в режиме стоянки.

Контакт медного провода с угольными вставками является несимметричным. В графите в связи

с его большим, чем у меди, удельным электрическим сопротивлением выделяется больше тепла, которое к тому же хуже отводится из-за более низкой теплопроводности. Такая токосъемная пластина нагревается в большей степени, чем медная. Как видно из рис. 9, изотерма максимальной температуры находится в графите. Тепловой поток Φ_1 , выделившийся выше этой изотермы, отводится в глубину угольной вставки, а поток Φ_2 , образовавшийся между изотермой и контактной плоскостью, проходит через эту плоскость в глубину медного провода, так как между изотермой максимальной температуры и плоскостью контакта существует разность температур. В связи с низким удельным сопротивлением ме-

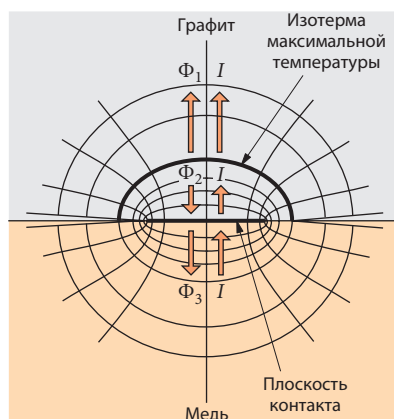


Рис. 9. Термическое и электрическое поля в несимметричном контакте: Φ — тепловой поток; I — электрический ток, протекающий через контакт

ди тепловые потери в ней (Φ_3) невелики. Они также отводятся в глубину контактного провода. Таким образом, при несимметричном контакте вызывают интерес две температуры: максимальная в угольной вставке, соответствующая изотерме максимальной температуры всей контактной зоны, и температура контактной плоскости, являющаяся также максимальной температурой меди. Отсюда следует, что путем уменьшения электрического сопротивления угольной вставки и/или улучшения ее теплопроводности нагрев контактного провода может быть уменьшен, так как в этом случае доля тепла, образовавшегося в угольной вставке и отводящегося в контактный провод, будет меньше. Это достигается с помощью пропитки графита такими легкими металлами, как алюминий или магний. Применение для этой цели легких металлов позволяет получить более легкий материал вставки по сравнению с графитом, пропитанным медью.

Рассмотренные взаимозависимости позволяют выполнить расчет максимальной температуры контактного провода и угольной вставки в режиме стоянки. Для каждой из трех зон, показанных на рис. 9, определяется тепловой баланс, на основании которого выводится уравнение, в значительной степени сходное с приведенным выше. Для определения максимальной температуры контактного провода и угольных вставок необходимы удельные электрические сопротивления и теплопроводности графита и меди, температуры двух исходных точек на проводе и вставке, которые не подвержены влиянию тепла контакта, а также контактное напряжение между этими точками. С другой стороны, можно также определить критическое контактное напряжение, при котором уже следует учитывать разупрочнение меди или усиление окисления графита угольной вставки. Температура разупрочнения меди составляет 190 °С, а начиная с

температуры нагрева поверхности угольной вставки 350 °С следует считать с усиленным окислением графита. В ходе исследований для экстремальных режимов обоих контактирующих тел был проведен расчет критического контактного напряжения. Результаты расчета приведены в таблице.

Температура разупрочнения меди достигается при контактном напряжении 1,8 В. При этом максимальная температура внутри угольной вставки составляет 700 °С. Усиленное окисление графита начинается при контактном напряжении 2,7 В. Как показали расчеты, внутри угольной вставки температура при этом может достигать 1580 °С.

Выводы

Как уже упоминалось, под электрическим износом следует понимать плавление, испарение и выгорание материала токовых мостиков в контакте, так как они нагреваются в наибольшей степени. На основе результатов расчета температуры в зоне контакта и, соответственно, температуры токовых мостиков можно сделать некоторые выводы об электрическом износе. В приведенном ранее примере расчета определена температура угольной вставки, с которой начинается усиленное окисление графита, выражающееся в его выгорании. Этот материал не плавится, а подвергается сублимации, т. е. сразу переходит из твердого состояния в газообразное. В расчетах принималось, что окисление начинается при достижении на поверхности угольной вставки температуры 350 °С. При этом внутри нее температура может быть выше 1500 °С. При наличии кислорода это ведет к выгоранию графита. При измерениях контактного сопротивления, проводившихся в режиме стоянки, контактное напряжение достигало 1,9 В при токе, протекающем через контакт, равном 100 А на одну вставку. Для получения воспроизводимых результатов при этих измерениях следи-

Критическое контактное напряжение и максимальная температура угольной вставки токоприемника

Параметр	Критические температуры на контактной поверхности	
	разупрочнения меди (190 °С)	окисления графита (350 °С)
Удельное электрическое сопротивление меди, Ом·м	$2,93 \cdot 10^{-8}$	$4,01 \cdot 10^{-8}$
Удельное электрическое сопротивление графита, Ом·м	$3,5 \cdot 10^{-5}$	
Температура контактного провода, °С	80	
Температура угольной вставки токоприемника, °С	100	
Критическое контактное напряжение, В	1,8	2,7
Максимальная температура внутри угольной вставки (изотерма максимальной температуры), °С	700	1580

ли за тем, чтобы угольная вставка как можно лучше прилегалась к контактному проводу. В эксплуатации, естественно, нельзя рассчитывать на то, что такое прилегание всегда будет оптимальным. Здесь плотность контакта всегда меньше оптимальной, в результате чего будут большими контактное напряжение, нагрев зоны контакта и, в конечном счете, электрический износ.

Поскольку при увеличении силы прижатия контактное сопротивление снижается, температура токовых мостиков и величина электрического износа уменьшаются. Увеличение тока, протекающего через контакт, также способствует уменьшению контактного сопротивления. Однако в этом случае увеличивается падение напряжения на контакте, так как контактное сопротивление уменьшается не в такой степени, в какой увеличивается ток. В результате увеличиваются нагрев и, соответственно, электрический износ. Пропитка металлом графита вставки ведет не только к повышению ее электропроводности, но также уменьшает электрический износ, так как при этом уменьшаются контактное сопротивление, контактное напряжение и нагрев зоны контакта.

В приведенном ранее примере расчета определяли контактное напряжение, при котором наступит разупрочнение меди. Полученная величина, равная 1,8 В, является реальной для нормальных условий эксплуатации. При этом разупрочнению подвергается тонкий слой меди на поверхности провода. В результате непосредственного электрического износа не происхо-

дит, но создаются условия для увеличения механического износа.

Температура плавления меди, при которой происходит электрический износ контактного провода, составляет 1083 °С. В условиях эксплуатации электроподвижного состава переменного тока при нормальном прилегании угольных вставок к медному контактному проводу, когда обеспечивается надежный токосъем без образования электрической дуги, нагрев контакта до такой температуры маловероятен. Кроме того, прежде произошло бы выгорание графита контактной вставки. Таким образом, электрический износ в этих условиях настолько мал, что преобладающим является износ механический, обусловленный силами трения.

Для расчета нагрева зоны контакта при движении электроподвижного состава следует учитывать не только силы трения, но и длительность воздействия. Это ведет к необходимости составления системы парциальных дифференциальных уравнений, решение которых требует значительных затрат и часто бывает возможным лишь с соответствующими допущениями и ограничениями.

Для более глубокого изучения проблемы износа системы контактный провод — контактные пластины (или угольные вставки) необходимо исследовать влияние дугообразования на электрический износ. Недостаточно изученным остается также и механический износ в рассматриваемой паре трения.