

**МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ РФ  
ДЕПАРТАМЕНТ КАДРОВ И УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
САМАРСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА им. М.Г.ЕЛИЗАРОВА**

---

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ**

Учебно-методическое пособие для студентов  
специальности 101800 - "Электроснабжение  
железнодорожного транспорта"

Составители: А.А. Комаров  
В.Н. Яковлев

Самара 2001

УДК 621.3.066

Учебно-методическое пособие по дисциплине “Тяговые и трансформаторные подстанции для студентов специализаций: 101801 – “Электроснабжение железных дорог” и 101802 – “Компьютерные технологии в электроснабжении ”. – Самара: СамИИТ, 2001.- 51 с.

В учебно-методическом пособии отражены элементы теории электрических контактов: контактная поверхность, сопротивление электрических контактов, нагрев контактов в режиме длительного протекания номинального тока, особенности работы контактов в режиме протекания тока короткого замыкания. Изложены основные конструкции твёрдометаллических контактов, их работа и износ. В пособии приведены основные материалы изготовления контактов современных электрических аппаратов и требования к ним.

Учебно-методическое пособие является дополнением к изучению раздела “Коммутационные электрические аппараты” дисциплины “Тяговые и трансформаторные подстанции”.

Составители: Комаров Александр Анатольевич  
Яковлев Вениамин Николаевич

Рецензенты:

д.т.н. профессор  
СамИИТа

/ Б.Г.Иванов /

Начальник службы  
Электроснабжения  
Самарского метрополитена

/ В.В.Ларкин /

## 1. Контактная поверхность

В технике под поверхностью понимают границу между реально существующими телами и окружающей их средой. Простейшая форма поверхности – плоскость. Практически невозможно получить строго заданную форму поверхности, часто в этом и нет необходимости.

В технике поверхности принято делить на ровные гладкие, ровные шероховатые и неровные. Лишь некоторые поверхности оптических приборов условно могут быть отнесены к гладким. Поверхности электрических контактов, как правило, являются шероховатыми.

В зависимости от назначения все поверхности можно разделить на группы: активная и пассивная. Первая группа в процессе эксплуатации работает на износ, воспринимает нагрузки и испытывает трение. Эти детали со сравнительно хорошей макро- и микрогеометрией. К ним относятся и поверхности электрических контактов. Поверхность второй группы в процессе эксплуатации не взаимодействует с другими поверхностями, однако, улучшает внешний вид изделий и защищает их от коррозии.

На рис.1 изображена модель контактной поверхности. Вся поверхность контакта представляет собой кажущуюся контактную поверхность, так как, вследствие шероховатости, действительное соприкосновение контактирующих частей происходит только на отдельных участках а, б и в, представляющих собой в сумме истинную контактную поверхность. Действительная поверхность соединения двух проводников в местах а и б состоит: из контактных участков (пятен) с металлическим контактом, электросопротивление которых определяется удельным сопротивлением металлов пары и через которые протекает электрический ток без заметного переходного сопротивления; из контактных пятен с квазиметаллическим контактом, покрытым тонкими адгезионными и хемсорбированными плёнками, легко пропускающими электрический ток благодаря туннельному эффекту. Электрическое сопротивление этих пятен значительно.

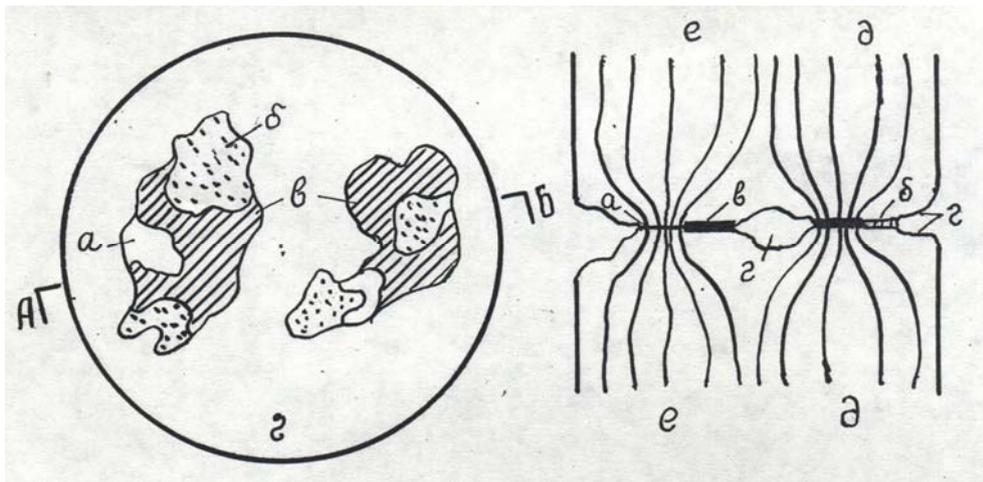


Рис.1. Схема поверхности контакта: а – чисто металлический контакт; б – квазиметаллический контакт; в – изолирующие плёнки; г – кажущаяся поверхность; д-д, е-е – линии тока

Действительная поверхность электрического контакта меньше действительной поверхности контактирующей пары трения, потому что на этой поверхности имеются ещё контактные пятна с практически непроводящими плёнками окислов, сульфидов и т.п. Эта часть поверхности тока не проводит (участок в) или вовсе не контактирует (участок г). Таким образом, контактирующие поверхности металлов состоят из участков с различной электропроводностью.

Основная особенность контактной поверхности – её шероховатость, выступы которой можно рассматривать как конусы со сферическими вершинами (рис.2,а), располагающиеся на некоторой волнистой поверхности (рис.2,в).

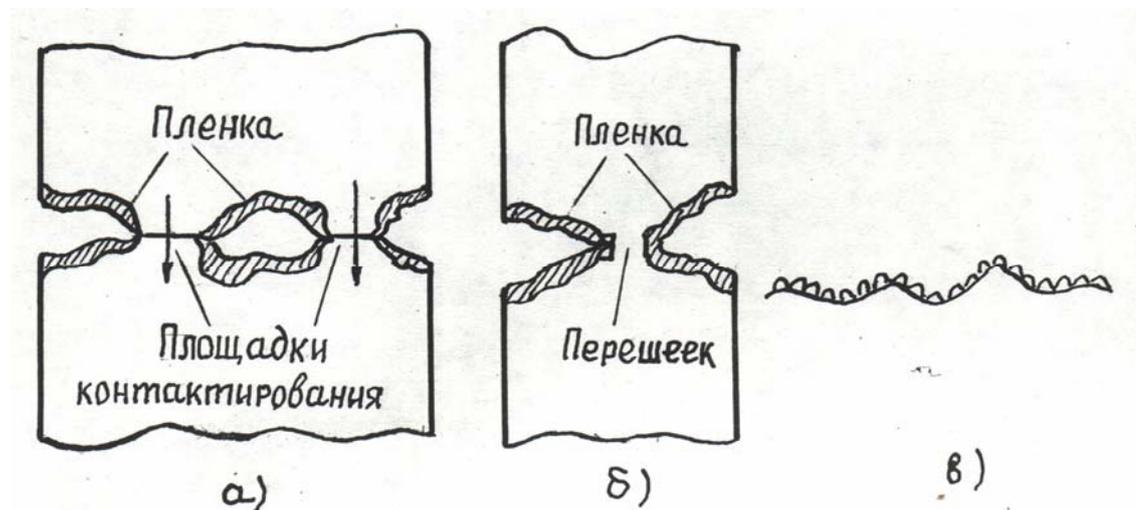


Рис.2. Физические явления при контактировании

Волнистость – это совокупность периодических, регулярно повторяю-

щихся и близких по размерам (высота 0,03...500 мкм) возвышенностей и впадин, расстояние между которыми (0,25...300 мкм) значительно больше, чем расстояние между микронеровностями. Фактические размеры мест соприкосновения точек (выступов) равны 2...3 мкм. Наиболее тщательно отделанные, шлифованные и полированные поверхности всё же имеют неровности высотой 0,005...0,1 мкм. Более грубые поверхности имеют выступы до 100...200 мкм.

Качество контактной поверхности зависит от чистоты (микрogeометрии) и физико-химических свойств металла в тонких верхних слоях (твёрдость, микроструктура, остаточные напряжения и т.п.). Форма неровностей контактной поверхности значительно влияет на следующие эксплуатационные свойства электрических контактов: износоустойчивость трущихся поверхностей, усталостную прочность, сопротивляемость эрозии, коррозионную устойчивость.

В процессе эксплуатации под влиянием сил сжатия контактных поверхностей происходит деформация металла в местах выступов (шероховатостей) и превращение их в маленькие поверхности – очаги (перешейки) проводимости или пропускания тока (рис.2,б). Чем больше силы сжатия контактных поверхностей, тем большее количество выступов деформируется. При этом металл деформируется частично пластически, частично упруго.

При упругих деформациях, возникающих при сравнительно небольших силах сжатия, выступающие участки поверхностей входят в механическое соприкосновение. Пластические деформации возникают при возрастании давления на контактирующие поверхности, достигающие предела упругости. В результате появляется остаточная деформация, и материал начинает течь. Величина деформации обратно пропорциональна твёрдости металла. Деформация контактов определяется напряжением смятия металла контактов. Зависимость между силой  $F_K$ , приложенной к контактам, и контактной поверхностью  $S_D$ , воспринимающей давление, имеет следующий вид:

$$F_K = S_D f, \quad (1)$$

где  $f$  – среднее удельное давление, зависящее от кривизны поверхности кон-

тактных частей, их волнистости, приложенной силы и модуля упругости материала.

Контактная поверхность, воспринимающая давление, во много раз меньше кажущейся поверхности контактов (рис.1,г), легко поддающейся измерению. Давление в разных точках контактной поверхности распределяется неравномерно.

Твёрдый металл, соприкасающийся с газообразной средой, имеет переходную пограничную зону. На контактной поверхности под воздействием кислорода, озона, азота, серы и прочих химических реагентов образуются плёнки, которые принято разделять на: адгезионные, плёнки потускнения, пассивизирующие, водяные, плёнки граничной смазки и пр. Получить действительно чистые контактные поверхности (контакты) чрезвычайно трудно, как и идеально ровные поверхности твёрдого тела (рис.2). Для поверхности контактов наиболее характерны плёнки: окисные, образующиеся при реакции с кислородом; сульфидные (реакция с  $H_2S$ ), кислородные (слой осаждённых из воздуха молекул кислорода), хлоридные и другие соединения. Плёнки имеют толщину 10...15 нм и удельное электрическое сопротивление  $\rho=10^{-5}$  Ом·см.

С течением времени толщина образующихся плёнок увеличивается. Плёнки химически реагируют с металлом, образуя плёнки окислов металла. У разных металлов эта плёнка имеет разное удельное сопротивление. Скорость нарастания плёнок на контактных поверхностях зависит от температуры и влажности воздуха, состояния и химического состава среды и др.

Формирование окисной плёнки происходит по-разному. Для никеля, например, в нормальных условиях это очень медленный процесс, ускоряющийся с ростом температуры. Для алюминия характерен быстрый рост плёнки  $Al_2O$  (десятки секунд) до толщины 2...2,5 нм. Дальнейший рост плёнки происходит значительно медленнее: при комнатной температуре через 20-30 дней её толщина достигает 6...10 нм.

Плёнки стойки к температуре, механически прочны и обладают изоляционными свойствами. Бронза существенно не окисляется. Не вступают в реак-

цию с кислородом такие металлы, как вольфрам, золото, платина. При температуре меньше  $200^{\circ}\text{C}$  образуется слой  $\text{Cu}_2\text{O}$ , толщина которого зависит от температуры нагрева и приобретает значения  $10\dots 1000$  нм. Электрическая проводимость образований  $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuO}$  очень мала и сопротивление плёнок может достигать  $10^6$  Ом. благородные металлы также подвержены окислению, однако, процесс окисления протекает медленнее. Слой  $\text{Ag}_2\text{O}$  толщиной  $2\dots 3$  нм прочен и легко разлагается при нагревании.

Слой оксидов является практически непроводящим. Однако под давлением он может быть частично разрушен, так как металл способен деформироваться пластически, сохраняя сцепление; слой же оксидов не может следовать этой деформации вследствие хрупкости. Поэтому, при давлении на контакты происходит скалывание инородного слоя; появляются трещины, в которые проникает металл, образуя проводящие контактные точки. По мере увеличения давления, число контактных точек и проводящая поверхность увеличиваются. При наличии скольжения между контактами образование трещин облегчается, так как при этом появляются касательные напряжения, и происходит срез. Чем толще плёнка, тем труднее проникновение металла в трещины.

К сульфидным плёнкам относятся, например, тёмные пятна на серебре. Возникают они в контактных условиях и представляют собой  $\text{Ag}_2\text{S}$ . Сульфидизация серебра происходит при наличии в атмосфере  $\text{H}_2\text{S}$  или  $\text{SO}_2$  и незначительной влажности. Продукты потускнения  $\text{Ag}_2\text{S}$  намного легче самого серебра, поэтому разрушаются механическим путём при замыкании контактов. Хотя сульфид серебра  $\text{Ag}_2\text{S}$  относится к группе полупроводников, его удельное сопротивление всё же очень велико –  $10^8$  Ом·см.

Пассивирующие плёнки, занимающие промежуточное положение между адгезионными плёнками и плёнками потускнения, возникают иногда на поверхности некоторых металлов с валентностью 2 и более (например, цинк) и имеют более или менее постоянную толщину, равную  $1,0\dots 1,5$  нм. Электрическое сопротивление пассивирующих плёнок изменяется со временем в зависимости от степени включения туннельного эффекта.

На поверхности всех металлов могут образовываться водяные плёнки, толщина их для разных металлов неодинакова. Если влажность в атмосфере превышает 70...80 %, то вода адсорбируется на поверхности металла, создавая слой толщиной до 5 нм на благородных металлах и до 10 нм на других металлах.

Под воздействием поверхностных плёнок увеличивается контактное сопротивление (плёнки могут вообще нарушать электрический контакт), уменьшаются сцепление и трение между контактными элементами. Плёнки влияют и на процесс разряда между размыкающимися контактами, облегчая процесс образования электрической дуги.

Таким образом, контактная поверхность, воспринимающая давление, состоит из трёх участков: первый хорошо проводит ток – металлический контакт; второй имеет квазиметаллический контакт – участок, покрытый тонкой плёнкой, не представляющей значительного сопротивления току; третий плохо проводит или совсем не проводит электрического тока (покрыт мономолекулярными плёнками).

Явления электрического контактирования ещё изучены недостаточно.

## 2. Сопротивление электрических контактов

Электрическая цепь любой электроустановки содержит различные элементы, которые между собой соединены при помощи электрических контактов. Например, в низковольтной сети на один трёхфазный электроприёмник в среднем приходится около 60 электрических контактов. От состояния любого из них зависит работоспособность всей электроустановки.

**Электрическим контактом** называют поверхность соприкосновения токоведущих элементов электротехнических устройств, обладающую высокой проводимостью, а также конструктивное приспособление, обеспечивающее такое соприкосновение. Деталь электрической цепи, соприкасающаяся с другой деталью при образовании электрического контакта, называется контакт-

деталью, а образование и существование электрического контакта – электрическим контактированием. В дальнейшем при описании устройств различных аппаратов контакты рассматриваются как контакты электрической цепи, т.е. части электрической цепи, предназначенной для коммутации и проведения электрического тока.

Электрические контакты, исходя из характера соприкосновения, обусловленного геометрической формой контактирующих проводников (контактных пар), условно можно разделить на три вида: точечный, линейный и поверхностный.

**Точечный электрический контакт** - электрический контакт, при котором соприкосновение рабочих поверхностей контакт-деталей происходит в точке. Следовательно, контактирование происходит только в одной точке – площадке (рис.3,а), например, соприкосновение таких поверхностей, как сфера - сфера, сфера - плоскость, вершина конуса - плоскость и т.п.

**Линейный электрический контакт** - электрический контакт, при котором сопротивление рабочих поверхностей контакт-деталей происходит по линии (рис.3,б), например, цилиндр – цилиндр (по образующей), цилиндр – плоскость, виток – виток и т.д. Физическая картина контактирования здесь представляет собой ряд точек – площадок (минимум две), расположенных на одной линии.

**Поверхностный электрический контакт** - электрический контакт, при котором соприкосновение рабочих поверхностей контакт-деталей происходит по поверхности (рис.3,в). Физическое контактирование происходит здесь в ряде точек площадок (минимум в трёх), расположенных на этой поверхности.

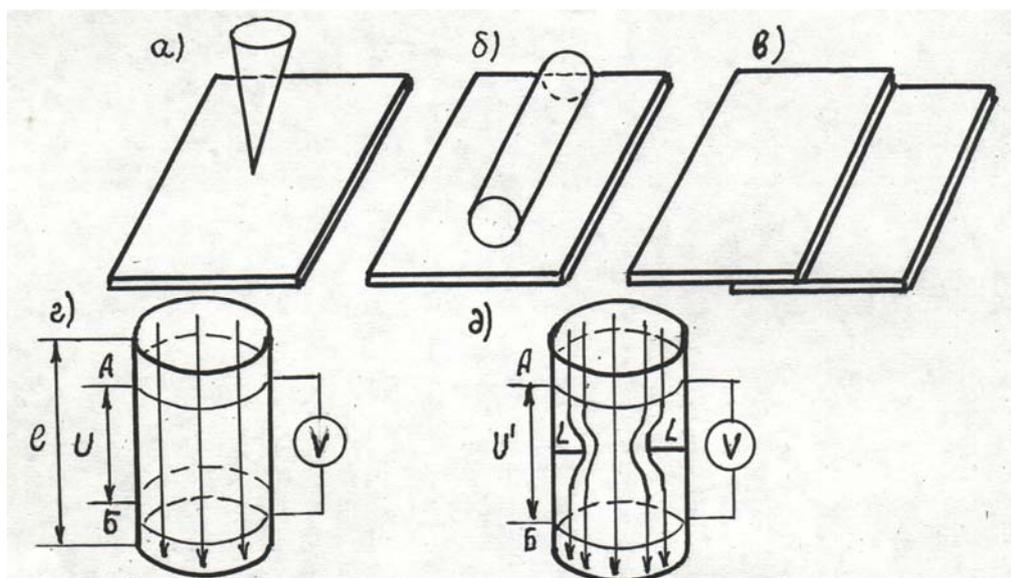


Рис.3. Типы контактов и физическая картина контактирования:  
 г – сплошной проводник; д – контакт двух проводников

Под рабочей поверхностью контакт-детали понимают часть поверхности контакт-детали, предназначенную для осуществления электрического контакта. При этом часть рабочей поверхности контакт-детали, по которой происходит соприкосновение с другой контакт-деталью, называют условной площадью контактирования, а часть условной площади контактирования, по которой электрический ток переходит из одной контакт-детали в другую, - эффективной площадью.

Тип контакта определяется его назначением, значениями тока и контактного нажатия, конструкцией контактного узла и всего аппарата. При этом следует всегда иметь в виду, что многоточечное контактирование обеспечивает более надёжный электрический контакт.

Поясним понятие “сопротивление контакта” на примере контактирования двух цилиндрических тел одинаковых размеров и выполненных из одного и того же материала. Пусть известно сопротивление (омическое)  $R_l$  участка АВ проводника длиной  $l$  (рис.3,г). Если этот проводник разрезать перпендикулярно оси по линии  $L-L$ , и получившиеся торцевые поверхности после обработки соединить в месте первоначального среза так, чтобы появился контакт (рис.3,д),

то измерение сопротивления участка  $R_2$  проводника той же длины  $l$  покажет, что оно превышает омическое сопротивление  $R_1$  участка АВ на некоторую величину  $R_K$ , определяемую выражением  $R_2 - R_1 = R_K$ . Разность сопротивлений называется **переходным сопротивлением контакта**  $R_K$ .

Таким образом, при сопряжении двух металлических проводников в месте перехода тока из одной детали (в данном случае цилиндрического тела) в другую возникает переходное сопротивление, природа появления которого связана с двумя обстоятельствами. Первое является следствием загрязнения или окисления торцевых поверхностей цилиндрических тел, с которыми обусловлено дополнительное сопротивление различных плёнок, образующихся на поверхности контактирования. Сопротивление плёнок  $R_{пл}$  в контактных соединениях аппаратов высокого напряжения (ВН) обычно является незначительным вследствие больших давлений. Однако с величиной  $R_{пл}$  приходится считаться при малых давлениях, что имеет место в некоторых аппаратах ВН (разъединители, блок-контакты, выключатели и др.). Сопротивление плёнок – сложная зависимость. Например, плёнка толщиной 1 нм очень хорошо пропускает электрический ток благодаря туннельному эффекту. Опытным путём установлено, что различные непроводящие плёнки покрывают, приблизительно, 75 % площади контура, воспринимаемого усилия сжатия. Второе, не менее важное обстоятельство, состоит в том, что при сжатии двух проводников, обращённых друг к другу плоскими гранями, касание происходит не по всей плоскости, а только отдельными площадками, расположенными по плоскостям в соответствии с микрогеометрией сдавливаемых граней. При этом картина протекания тока резко изменится, так как ток должен пройти не через всё сечение, а лишь через его часть (рис.3,д), и по сравнению со сплошным проводником (рис.3,г) будет использовано не всё поперечное сечение, т.е. сопротивление протекания тока возрастает. Величина этого сопротивления, появляющегося в результате стягивания линий тока к истинной площадке соприкосновения, называется **сопротивлением стягивания**  $R_C$ .

Таким образом, сопротивление контакта может быть представлено как

сумма сопротивлений  $R_C$  и посторонних слоёв плёнок  $R_{ПЛ}$ :

$$R_K = R_C + R_{ПЛ}. \quad (2)$$

Сопротивление плёнок может меняться в процессе эксплуатации в очень широких пределах. Сопротивление стягивания зависит, в первую очередь, от материала контактов, числа площадок соприкосновения и силы сжатия. Поэтому существование чисто металлического контакта представить почти невозможно.

Сопротивление стягивания  $R_C$  составляет основную часть сопротивления контакта, поскольку сопротивление тонкой плёнки из адсорбированных газов незначительно. Выражение (2) также справедливо и для окисленных контактов, хотя их сопротивление значительно больше вследствие меньшего числа и меньших размеров контактных точек.

Реальное соприкосновение твёрдых поверхностей происходит в областях, состоящих из отдельных точек касания, которые расположены случайно на видимой кажущейся геометрической поверхности соприкосновения. Для оценки факторов, влияющих на сопротивление стягивания, Р.Хольмом предложена модель круговой площадки касания.

Термин “контактное сопротивление” сохраняется независимо от того, является ли оно чистым сопротивлением стягивания или же имеется плёнка, которая вносит на проводящей поверхности дополнительное сопротивление.

Рассмотрим влияние различных факторов на переходное сопротивление контактов. Значение переходного сопротивления зависит от многих факторов, главные из которых – микрорельеф, усилие сжатия и материал контактной поверхности.

На рис.4 показана кривая 1 зависимости переходного сопротивления  $R$  при увеличении усилия сжатия или контактного давления. Первоначально сопротивление резко снижается в связи с быстрым ростом числа точек и площадок контактирования. Дальнейшее увеличение давления приводит к замедленному снижению сопротивления, так как интенсивность деформации неровностей материала снижается. Начиная с некоторого критического усилия нажатия,

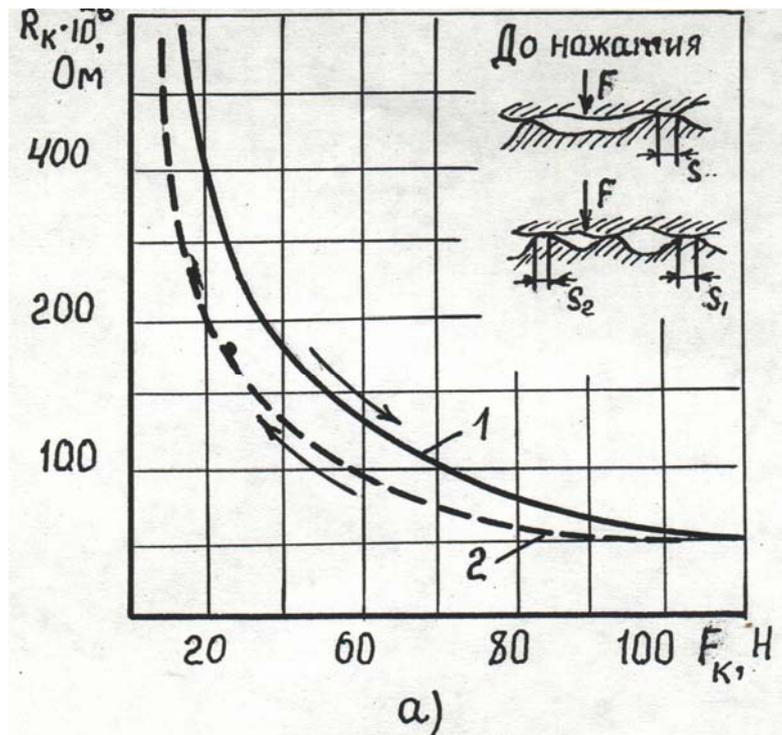


Рис.4. Зависимость переходного сопротивления от силы нажатия

переходное сопротивление остаётся практически неизменным. При снятии контактного давления сопротивление контакта возрастёт по кривой 2, которая идёт несколько ниже кривой 1. Разный ход кривых объясняется наличием остаточных деформаций отдельных бугорков (выступов), по которым происходило контактирование. Зависимость сопротивления контакта от приложенной силы является сложной и может быть найдена лишь для частного случая – точечного контакта, образованного сферой и плоскостью или двумя цилиндрами с одинаковыми радиусами. Под действием силы  $F$ , направленной по прямой, соединяющей центры кривизны, первоначальное точечное касание перейдёт в касание по круглой площадке с радиусом  $a$ . Давление распределяется по контактной площадке неравномерно: наибольшее давление имеет место в центре площадки, где оно в 1,5 раза больше среднего давления; у краёв площадки давление равно нулю. При достаточно большой силе можно принять, что давление по всей площадке одинаково и равно твёрдости материала контактов:

$$F_k = \sigma_T \pi a^2, \quad (3)$$

где  $\sigma_T$  - твёрдость материала контактов по Бринеллю.

Зависимость сопротивления линейного и плоского контактов от давления не может быть представлена аналитически, поскольку число и размеры контактных точек неизвестны. Установлено, что сопротивление плоского контакта зависит от удельного сопротивления и твёрдости металла и от обработки поверхности и силы, приложенной к контактным частям. Важно, что сопротивление контакта не зависит от кажущейся поверхности соприкосновения.

Соприкосновение точечного контакта, при прочих равных условиях, меньше линейного и плоскостного. При росте силы  $F_K$  сопротивление точечного контакта снижается незначительно по сравнению с линейным, и, особенно, плоскостным. Это нетрудно объяснить, так как увеличение сжимающей электроды силы вызывает увеличение числа контактных точек, а не их геометрических размеров.

Следует отметить, что при одной и той же величине  $F_K$  переходное сопротивление одного и того же контакта при каждом замыкании может быть разным и отличаться в достаточно широких пределах: в больших - при малом давлении и меньших – при больших (более 100 Н). Объясняется это тем, что число и размер площадок контактирования при каждом замыкании могут быть различными.

Зависимость переходного сопротивления от давления для свежезачищенных контактов согласно эмпирической формуле Н.Е. Лысова [6] имеет вид:

$$R_K = \frac{k}{(0,1F_K)^m} \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

где  $m$  и  $k$  – коэффициенты, значения которых приведены в таблице 1.

Переходное сопротивление контактного соединения в сильной степени зависит от состояния поверхности контактирования. Весьма важно обеспечить устойчивость или малую изменяемость  $R_K$  во времени. Возрастание  $R_K$  объясняется окислением поверхности контактов воздухом, коррозией контактного соединения от проникновения в него влаги и пр. Поэтому необходимо защищать контактные поверхности от разрушения известными способами обработки.

Значения коэффициентов  $m$  и  $k$  в эмпирической формуле Н.Е. Лысова

Тип контакта	Материал	$k$	$m$
Торцевой контакт (торцы цилиндра)	медь - медь	49,6	0,39
	медь- латунь	203	0,50
	латунь – латунь	226	0,373
Пальцевый самоустанавливающийся контакт (без гибких связей).	медь - латунь	123	0,183
	латунь – латунь	192	0,306
Один сегмент розетки без гибкой связи. Диаметр расточки сегмента меньше диаметра стержня	медь - медь	25,4	0,332
	медь- латунь	67,7	0,372
	латунь – латунь	95,5	0,136

На величину переходного сопротивления контактов может влиять величина протекающего через него тока (рис.5). Очевидно, это связано с повышением пластичности материала контактов при увеличении нагрева их током. В случае контактных соединений, где давление может достигать многих тонн, токи, при которых  $R_K$  начинает падать, достигают очень большой величины.

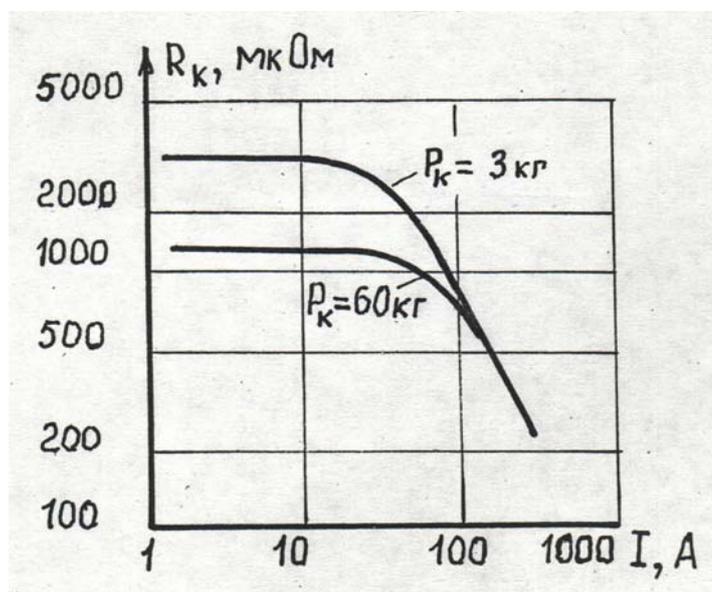


Рис.5. Зависимость переходного сопротивления контактов от тока при разных давлениях

Переходное сопротивление, как уже отмечалось, зависит от толщины плёнки. Она, в свою очередь, является функцией химической активности металла контакта; состояния и химического состава окружающей среды, в кото-

рой находятся контакты; силы сжатия электродов и пр.

Контакты из благородных металлов, не подвергаясь окислению, способны коммутировать электрический ток даже при незначительных усилиях сжатия (несколько граммов). Такие металлы, как платина, иридий, палладий, золото и их сплавы обеспечивают надёжный контакт при незначительных контактных давлениях. Они наиболее приемлемы для получения устойчивого контактного сопротивления.

Коммутирующие контакты, длительно работающие под током не выключаясь, выполняются, как правило, из серебра или металлокерамики на основе серебра. Общее свойство последних – уменьшение контактного сопротивления при росте температуры, и увеличение силы сжатия. Материалы большей твёрдости имеют большее переходное сопротивление и требуют большего контактного нажатия. Чем выше электрическая проводимость и теплопроводность материала, тем ниже переходное сопротивление.

Переходное сопротивление контакта мало зависит от размера условной площади контактирования. Однако же, с увеличением номинального тока надо увеличивать и внешнюю поверхность контакт-деталей, так как с ростом тока растут потери, и для их рассеяния требуется большая поверхность.

### **3. Нагрев контактов в режиме длительного протекания номинального тока**

Сопротивление контактов не остаётся постоянным в процессе эксплуатации. Контактное сопротивление представляет собой источник дополнительных джоулевых потерь. Поэтому температура контактов всегда выше температуры прилегающих к нему проводников.

Под воздействием агрессивных газов, как было сказано выше, на поверхности металла контактов происходит образование плёнки, толщина которой с течением времени увеличивается, а это, в свою очередь, ведёт к росту  $R_K$ . Но, одновременно, увеличиваются: падение напряжения на контакте; градиент

электрического поля в плёнке, разделяющей контакт, и температура площади контактирования. Совместное действие электрического поля и температуры приводит к разрушению плёнки. Этот процесс, имеющий особое название “фиттинг”, до настоящего времени не получил полного объяснения. В результате фиттинга  $R_K$  падает до величины, близкой к первоначальной. Затем начинается повторение процесса роста сопротивления и вновь наступает разрушение плёнки. Но если образующаяся плёнка достаточно прочна, то сопротивление контакта может возрасти до недопустимых величин, при которых температура контакта будет опасной как для изоляции электрооборудования, так и для самих контактов. Поэтому при эксплуатации необходимо строго соблюдать установленные многолетним опытом нормы температуры контактов, приведённые в табл.2.

Рассмотрим процесс нагрева точечного торцевого контакта (рис.6). Обозначим через  $P$  мощность тепловых потерь в различных точках контакта. Ток  $I$ , проходя по телу контакта, нагревает его. Тепло  $P_1 = (1/2)I^2 R_K$  входит в торец контакта.

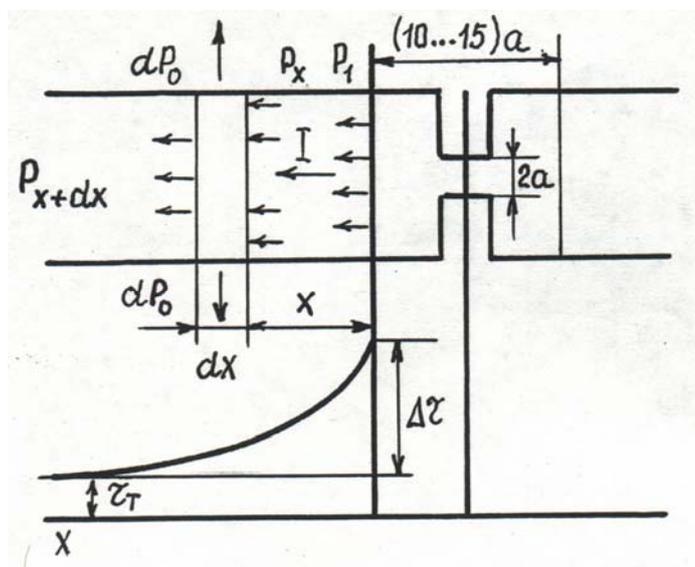


Рис.6. К расчёту температуры контактов

Таблица 2

Допустимая температура нагрева контактов

Вид аппарата	Тип контактов	$Q_{\text{доп}}, ^\circ\text{C}$
Контакторы общепромышленного применения	Главные контакты из меди и кадмиевой меди	105
Контакторы общепромышленного применения	Из серебра и материалов на его основе	Ограничиваются предельно допустимой температурой
Тяговые аппараты, непружинящие контакты	Вспомогательные контакты с контактной частью из серебра	120
	Контакты непружинящие массивные медные или из композиций на основе меди	115
	Вспомогательные контакты с контактной частью из серебра или композиций на его основе	105
	Клиновые и скользящие из меди, латуни, бронзы или стали	115
	Клиновые медные рубильников и предохранителей	90
	Тяговые аппараты, пружинящие контакты	Клиновые и скользящие: медные
бронзовые		105
стальные		85
с напайками из серебра или композиций на его основе		115
Контактные соединения с зажимами и заклёпками: алюминиевые с оловом		85
медные со спаем олова или кадмия		100
	медные со спаем серебра	120

\* - Для контактов из серебра и композиций на его основе допускается температура до  $200^\circ\text{C}$ .

Одновременно через боковую поверхность тепло отдаётся в окружающее пространство. При установившемся режиме тепло, которое входит в элемент толщиной  $dX$ , равно теплу, которое из него выходит:

$$P_x + dP_x = dP_0 + P_{x+dx}, \quad (5)$$

где  $P_x = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \cdot q$  - тепло, которое подошло к элементу справа;

$dP_x = I^2 \rho \frac{dx}{q}$  - тепло, которое выделяется в этом элементе;  $dP_0 = k_T p (\theta - \theta_0) \cdot dx$

- тепло, отдаваемое с боковой поверхности;

$P_{x+dx} = -\lambda \frac{d\theta}{dx_{x+dx}} \cdot q$  - тепло, которое выходит из элемента в направлении

оси  $X$ ;  $q$  – сечение контакта;  $p$ - периметр сечения контакта;  $\lambda$  - теплопроводность материала контакта.

Обозначим  $\tau = \theta - \theta_0$  и подставим в (5) мощности  $P_x$ ,  $dP_x$ ,  $P_{x+dx}$ , выраженные через ток и определяющие их параметры.

После преобразования получим

$$\frac{d^2\tau}{dx^2} + \frac{k_T}{\lambda q} + \frac{I^2 \rho}{q^2 \lambda} = 0. \quad (6)$$

Решая это уравнение с учётом начальных условий, получаем

$$\tau = \frac{I^2 R}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda k_T p q}} e^{-\sqrt{k_T p / \lambda q} X} + \frac{I^2 \rho}{k_T p q}. \quad (7)$$

Тогда температура контактной точки

$$\theta_{\text{конт}} = \theta_0 + \tau_T + \Delta\tau + \Delta\tau_{\text{конт}} = \theta_0 + \frac{I^2 \rho}{k_T p q} + \left(\frac{1}{2}\right) I^2 R_{\kappa} \frac{1}{\sqrt{\lambda k_T p q}} + \frac{(IR_c)^2}{8\lambda p}, \quad (8)$$

где  $\tau_T$  - превышение температуры тела контакта относительно окружающей среды;  $\Delta\tau$  - превышение температуры контакта в начале области стягивания, определяемое

$$\Delta\tau = \frac{1}{2} I^2 R_{\kappa} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda k_T p q}}.$$

С ростом температуры сопротивление стягивания изменяется из-за роста удельного сопротивления материала.

Зависимость сопротивления стягивания  $R_{\kappa}$  от превышения температуры:

$$R_k = R_{k0} [1 + (2/3) \cdot \alpha_R \Delta\tau_{\text{конт}}], \quad (9)$$

где  $R_{k0}$  - сопротивление стягивания при температуре, равной температуре на границе области стягивания  $\theta = \theta_0 + \tau_T + \Delta\tau$ ;  $\alpha_R$  - температурный коэффициент сопротивления материала контактов,  $1/^\circ\text{C}$ .

При увеличении тока через контакт увеличивается падение напряжения  $U_{\text{конт}} = IR_c$ , соответственно возрастает превышение температуры контактной площадки  $\Delta\tau_{\text{конт}}$ . Это, в свою очередь, вызывает увеличение сопротивления согласно (9). Зависимость сопротивления  $R_k$  от напряжения характеризует  $RU$  - характеристика, приведённая на рис.7.

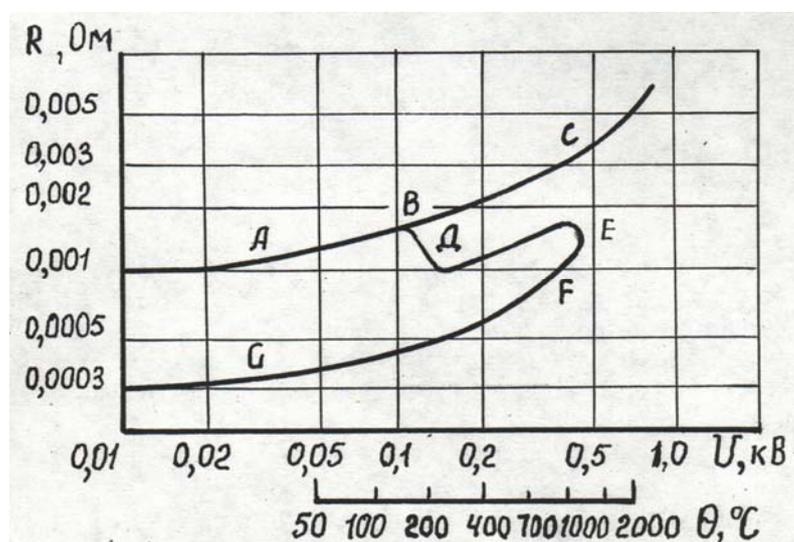


Рис.7. Зависимость сопротивления контактов от превышения температуры

Зависимость (9) справедлива до тех пор, пока размеры контактной точки неизменны. Исследования О.Б.Брона [11] показали, что при длительном пребывании серебряных контактов под током их переходное сопротивление с ростом температуры не возрастает, а наоборот падает по линейному закону. Опыты проводились при температуре до  $140^\circ\text{C}$ . Отступление от соотношения (9) объясняется тем, что в результате длительного нагревания в площадках контактирования происходит медленная пластическая деформация материала, приводящая к уменьшению  $R_k$  и к росту этих площадок. Коэффициент  $\alpha_R$  оказывается отрицательным. Выше сказанное хорошо просматривается на  $RU$  - характеристике, изображённой в логарифмическом виде на рис.7. Характеристика зави-

симости сопротивления от напряжения представляет собой зависимость контактного сопротивления  $R$  от напряжения на контакте  $U$  и является типичной для металлического контакта, образованного при некотором давлении скрещенными медными стержнями. Кривая ABC рассчитана по (9) в предположении, что контактная поверхность остаётся неизменной. Можно получить экспериментально участок АВ этой кривой вплоть до точки В. В точке В, соответствующей превышению температуры около  $180^{\circ}\text{C}$ , начинается размягчение металла. Контактная площадка увеличивается, и сопротивление контакта уменьшается (участок ВД представляет спад размягчения). После этого кривая вновь возрастает (участок ДЕ), однако, её наклон здесь меньше наклона кривой ВС вследствие продолжающегося размягчения. В точке Е температура контакта достигает температуры плавления.

Дальнейшее повышение напряжения невозможно, так как при этом контактные части сближаются, размер контактной площадки увеличивается, а сопротивление уменьшается (участок ЕF представляет собой спад плавления). При уменьшении напряжения (тока) можно получить ветвь FG, параллельную ABC, что доказывает постоянство контактной площадки вследствие происшедшего сваривания контактных частей. Плавление и сваривание размыкаемых контактов – явления весьма опасные, поскольку они могут явиться причиной отказа аппарата отключить электрическую цепь.

Напряжение размягчения  $U_p$  (соответствует точке В, рис.7) используется для нормирования маломощных контактов. Для них обычно принимают допустимое падение напряжения не более  $(0,5 \dots 0,8) U_p$ . Напряжение плавления тесно связано с процессом сваривания контактов.

Чтобы при длительном протекании номинального тока температура нагрева контакта не превосходила допустимой величины, необходимо стремиться к уменьшению переходного сопротивления  $R_k$  путём соответствующего выбора материала контакта и величины давления  $F_k$ .

Наряду с выделением джоулевой теплоты в контактах при протекании то-

ка могут проявляться три вида термоэлектрических эффектов, обусловленных взаимосвязью между электрическими и тепловыми явлениями в контакте, а именно: эффекты Томсона, Пельтье и Колера [10].

Сущность эффекта Томсона состоит в переносе теплоты с одной стороны контакта на другую носителями электрического тока, в результате чего одна сторона контакта нагревается больше другой.

Эффект Пельтье возникает при прохождении тока через место контактирования проводников из двух разнородных материалов. Он объясняется наличием контактной разности потенциалов. Если электрическое поле, создаваемое в спае контактной разностью потенциалов, ускоряет электроны, то в спае выделяется теплота Пельтье. Если поле задерживает движение электронов, то теплота поглощается.

Эффект Колера является результатом туннельного сопротивления, присущего плёнкам на поверхности соприкасающихся контактов. Кинетическая энергия прошедших через плёнку туннельных электронов увеличивается, когда они достигают анода, имеющего меньший отрицательный потенциал, чем катод. Избыток энергии преобразуется в виде теплоты. В результате анодная сторона нагревается сильнее.

Все три эффекта имеют место независимо от выделения теплоты Джоуля в контакте. Существенное влияние они могут приобретать лишь в контактах при протекании весьма малых токов.

#### **4. Особенности работы контактов в режиме протекания тока короткого замыкания**

При КЗ через контакты проходят токи, в 10...20 раз превышающие номинальные значения. При таких токах в контактах начинают заметно проявляться механические силы, практически не ощутимые при малых токах. Наряду с силой нажатия, развиваемой контактной пружиной, в зоне электрического контакта имеют место силы следующих видов: электродинамическая сила отталки-

вания контактов; электромагнитные силы стягивания металлического перешейка; электростатические силы притяжения между контактами – электродами, находящимися под некоторой разностью потенциалов; упругие силы паров металла, проявляющиеся при его кипении и “взрыве” перешейка.

Разная степень появления тех или иных сил в различных условиях может привести к появлению особенности в режимах работы контактов. Обычно, электростатические силы в контактах малы, и их не учитывают. Значение упругих сил паров металла может быть оценено выделением тепла в контактном перешейке, полностью уходящим на повышение его температуры. Из этого условия можно определить температуру в зоне контактного перешейка и давление паров металла при этой температуре. При больших токах эта сила может оказаться определяющей, вызывая самопроизвольное размыкание контактов под током. В результате может произойти их сваривание или разрушение возникающей электрической дугой.

При прохождении через замкнутые контакты тока КЗ, возникающие электродинамические силы  $F_{эд.у}$  (силы Двайта) (рис.8) стремятся их разомкнуть в соответствии с  $F_x = i_1 i_2 (dM/dx)$ . При этом необходимо отметить, что на разные контактные тела системы действуют различные силы, как это показано на рис.8, где  $a$  – радиус контактной площадки.

Если электродинамические силы отталкивания окажутся достаточными, чтобы вызвать расхождение подвижного и неподвижного контактов, то между ними возникает электрическая дуга. При этом из-за малой постоянной времени нагрева температура контактной площадки поднимается практически мгновенно и может достигнуть температуры плавления. Расплавленный металл после прекращения тока затвердевает, контакты свариваются.

Аналитический расчёт плавящего тока при КЗ затруднён, так как существующие формулы не учитывают размягчения материала при высокой температуре. Поэтому при расчётах целесообразно пользоваться опытными данными,

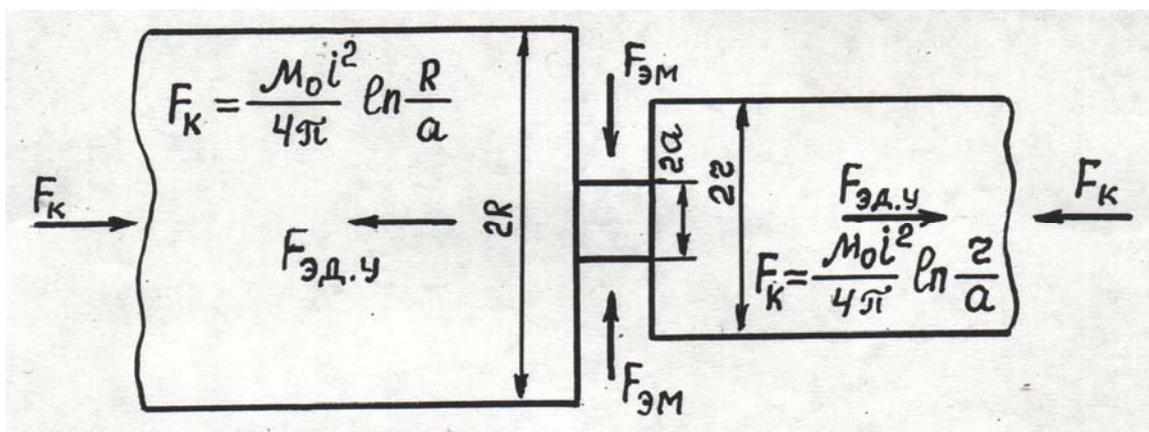


Рис.8. Силы, действующие в контакте

непосредственно связывающими ток сваривания и контактное нажатие. При расчётах электродинамической стойкости контактов достаточно точна экспериментальная формула Г.В. Буткевича [12]

$$i_y^2 (1/K^2) < 0,1 F_k, \quad (10)$$

где  $i_y$  - ток электродинамической стойкости (амплитуда ударного тока);  $K$  - коэффициент, зависящий от материала контактов и от конструкции контакта, приведён в таблице 3.

Таблица 3

Тип контакта	Материал	$K, A/H^{0,5}$
Щёточный	медь-латунь	950-1270
Пальцевый несамоустанавливающийся	медь-латунь	1300
Пальцевый несамоустанавливающийся	латунь- медь	1200
Пальцевый несамоустанавливающийся	латунь-сталь	1520
Пальцевый несамоустанавливающийся	латунь- латунь	1600
Пальцевый несамоустанавливающийся	медь- латунь	1820
Розеточный (на один элемент розетки)	медь- латунь	1740
Розеточный (на один элемент розетки)	медь-медь	1900

Электромагнитные силы стягивания  $F_{эм}$  (рис.8) металлического перешейка определяются тем, что линии магнитного поля в своём стремлении сократиться сжимают проводник. Напряжённость магнитного поля в металлическом перешейке контакта, создаваемого током  $I$ , равна:  $H = 1/2\pi a$ .

Действующая на металлический перешеек результирующая сила электромагнитного сжатия равна

$$F_{эм} = 4 \cdot 10^{-7} I^2 h \frac{1}{3a}. \quad (11)$$

Обычно высота  $h = (0,5 \dots 1,0) a$ .

Сила электромагнитного сжатия  $F_{эм}$  вызывает появление совпадающего по направлению с  $F_{эм,y}$  усилия, при этом имеем

$$F_n = \frac{F_{эм} \sigma_n}{1 - \sigma_n}, \quad (12)$$

где  $\sigma_n$  - коэффициент Пуассона, используемый в теории деформации твёрдых тел, равный отношению коэффициента поперечного сжатия материала к его коэффициенту упругости (обычно для металлов  $\sigma_n \approx 0,2 \dots 0,35$ ).

Сила  $F_n$  существенно возрастает, когда металлический перешеек находится в расплавленном состоянии.

Вследствие плавления контактных перешейков от нагрева джоулевым теплом или дугой происходит сваривание контактов. Принципиально различают два вида сваривания контактов: холодное сваривание, которое может наступить, когда контакты не нагреваются до температуры плавления материала, и сваривание при достижении температуры плавления.

Поверхностные плёнки в электрических аппаратах при определённых условиях способствуют холодному свариванию контактов, когда местная температура их не достигает температуры плавления. Такие условия могут наблюдаться под воздействием достаточной силы сжатия в контактах, когда на отдельных участках поверхностей контактирования происходят пластические деформации и газовая плёнка в этих местах как бы выделяется, образуя чисто металлическое касание контактов. Такие явления, обычно, возникают лишь на участках малой площади, так что результирующие силы сцепления оказываются несущественными в сравнении с механическими силами, действующими на контакты реальных аппаратов.

Поверхностные плёнки препятствуют холодному свариванию контактов, так как для его осуществления требуется тесное металлическое соприкосновение. По-видимому, играют роль: природа контактирующих металлов, тип кристаллической решётки, температура плавления и рекристаллизации, а также склонность к образованию оксидных или других плёнок.

Холодное сваривание контактов может наблюдаться и без тока. Чаще это происходит у контактов из более мягких металлов, сжатых при усилии выше предела текучести или получающих при замыкании достаточно энергии для размягчения контактных точек.

При работе контактов с дугой сваривание происходит при замыкании контактов вследствие слияния капель жидкого металла, расплавленного дугой, или вследствие сжатия под большим давлением раскалённого твёрдого металла. Здесь играют роль поверхностные свойства металлов, в частности, смачиваемость контактной поверхности расплавленным металлом. При этих условиях свариванию подвержены в большей степени менее тугоплавкие металлы и сплавы с худшей тепло- и электропроводностью.

Кроме разных видов сваривания, у маломощных контактов наблюдается спекание, которое вызывается пробоем при достаточных градиентах напряжения изолирующей плёнки и пронизывающими её металлическими мостиками, соединяющими контакты. Прочность спекания невелика, устраняется при лёгком сотрясении контактов.

Склонность материала контактов к свариванию связана, прежде всего, с его термическими свойствами: температурой и скрытой теплотой плавления, а также с теплопроводностью материала.

Точка плавления контактирующих металлов характеризуется “напряжением плавления”, которое для данного металла может рассматриваться как константа. Для некоторых контактных материалов экспериментально найдены напряжения сваривания  $U_{CB}$ . Напряжение сваривания  $U_{CB}$  через ток плавления

или сваривания и контактное сопротивление определяется уравнением

$U_{CB} = I_{CB} R_K$ , откуда

$$I_{CB} \approx \frac{2U_{CB}}{\rho} \sqrt{\frac{nF_K}{\pi\sigma_{CM}}}, \quad (13)$$

где  $n$  – число площадок в контакте;  $\sigma_{CM}$  – сопротивление контактного материала смятию.

Эта зависимость не связана с временем протекания тока. Ток сваривания тем больше, чем больше напряжение плавления, число контактирующих точек и контактное усилие, и тем меньше, чем больше удельное сопротивление и твёрдость металла. Следовательно, труднее свариваются контакты более тугоплавкие, более электропроводные (а значит теплопроводные) и более мягкие, сжатые с большим усилием. Для данного металла, у которого  $U_{CB}$ ,  $\rho$  и  $\sigma_{CM}$  являются константами, привариванию препятствует высокое контактное давление. Если напряжение на контактах  $U_K < U_{CB}$ , то не может произойти ни образования жидких мостиков, ни сваривания контактов в замкнутом виде.

И.С. Таев [10] предлагает эмпирическую зависимость для тока сваривания контактов, полученную для условий протекания переменного тока 50 Гц при наличии апериодической слагающей

$$I_{мин} \approx K \sqrt{0,102 F_K}. \quad (14)$$

Величина эмпирического коэффициента  $K$  приведена ранее в таблице 3. Поэтому  $I_{мин}$  является ударным током и равен

$$I_{мин} = I_y = K_y \sqrt{2} I_H, \quad (15)$$

где  $I_H$  - действующее значение установившегося тока;  $K_y$  - ударный коэффициент (для низковольтных установок  $K_y \approx 1,3$ ).

На рис.9 даны зависимости сваривающего тока от силы сжатия в контактах из различных материалов.

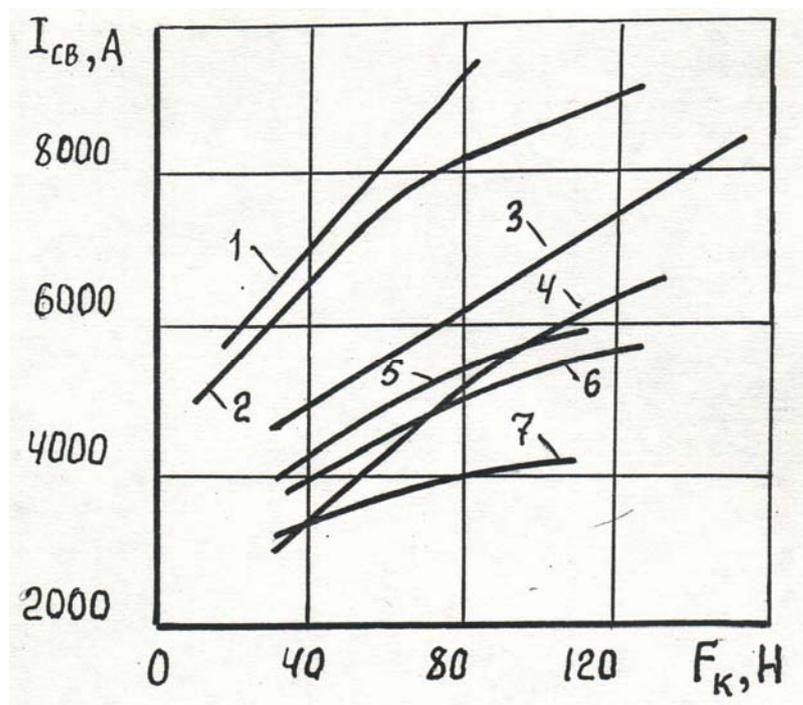


Рис.9. Зависимость тока сваривания контактов от силы сжатия:  
 1 – серебро; 2 – медь; 3 – 93 % Ag Cu+7 % Cu; 5 - 85 % Ag +15% CdO; 6 – то же, что и 5, но мелкодисперсный; 7– 97 % Cu+3 % CdO

Сила контактной пружины окончательно выбирается выше силы контактного сжатия, рассчитанной для номинального режима; выше электродинамической силы, вызывающей самопроизвольное расхождение контактов, и больше той силы, при которой возможно сваривание контактов при токе КЗ (или другом сверхтоке).

Свойства металлов и сплавов, способствующие или препятствующие свариванию контактов следующие: температура плавления, скрытая теплота плавления, теплопроводность, напряжение плавления, твёрдость материала контакта и образование поверхностных плёнок.

## 5. Основные конструкции твёрдометаллических контактов

По назначению контакты можно разделить на соединительные, служащие только для проведения тока, и коммутирующие, на которые дополнительно воз-

лагаются задачи включения, отключения или переключения электрических цепей.

Для соединительных контактов характерно разделение на взаимно неподвижные неразъёмные (например, болтовые) и взаимно подвижные скользящие или катящиеся. Некоторые конструктивные исполнения соединительных контактов представлены на рис.10,а-д.

Соединительные контакты обеспечивают жёсткое соединение между собой отдельных неподвижных токоведущих деталей шин, кабелей и проводников. Надёжность сцепления металла контактов достигается с помощью либо болтов (разборные соединения), либо горячей или холодной сварки. Надёжность в длительной эксплуатации соединительных (не размыкаемых) контактов обеспечивается достаточно стабильным сопротивлением контакта электрическому току. Для этого соединительный контакт должен обладать способностью противостоять как воздействию окружающей среды, так и механическим усилиям от температурных деформаций, а также электродинамическим усилиям, возникающим при протекании больших токов КЗ. Эти требования выполняются при болтовом соединении медных шин тщательным очищением от оксидов и смазыванием техническим вазелином их мест стыкования при монтажной сборке.

Стабильное переходное сопротивление соприкасающихся поверхностей контактов достигается путём покрытия их оловом (лужение) или серебром. Давление контактов должно быть достаточным, чтобы деформация была пластичной.

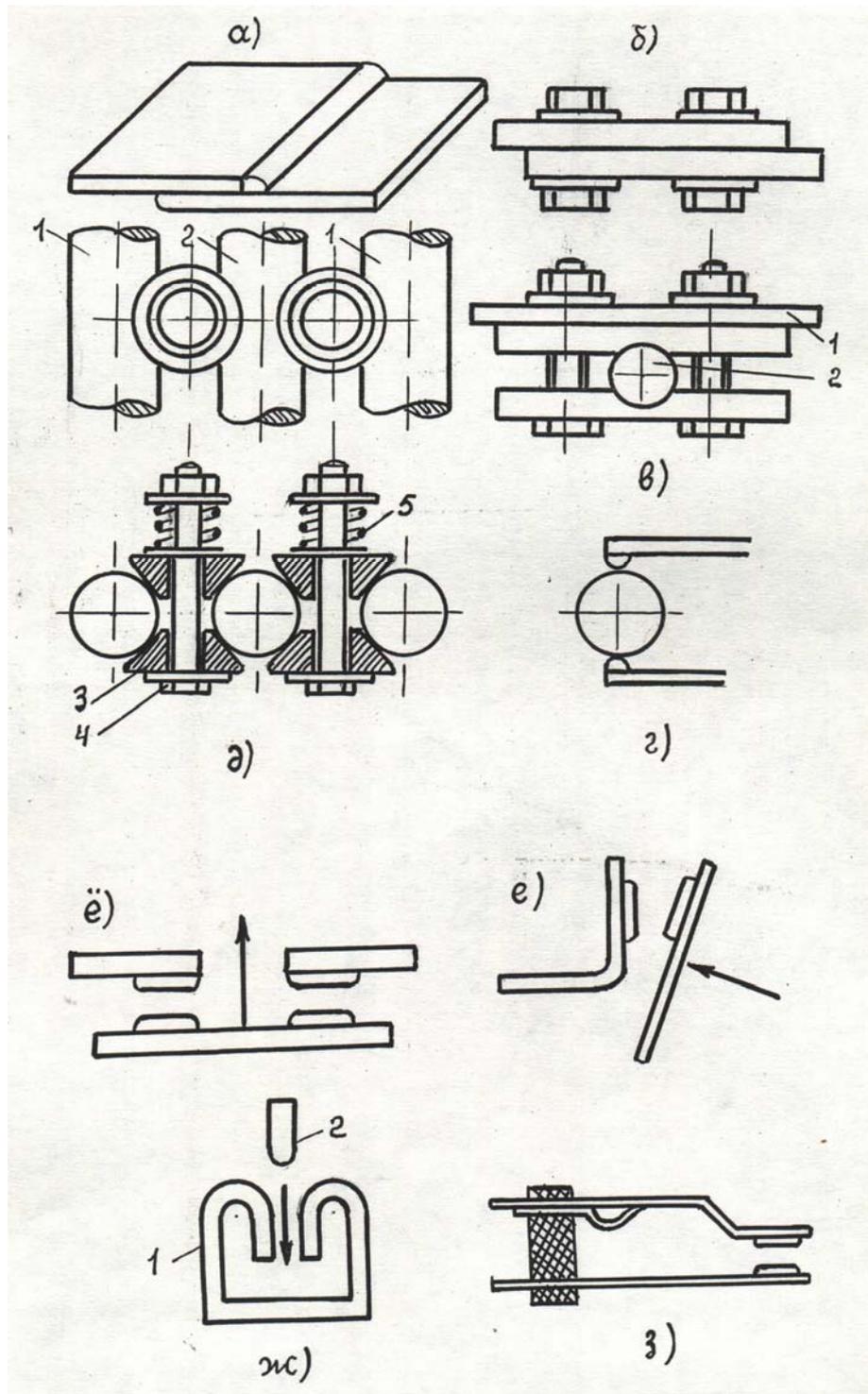


Рис.10. Соединительные контакты: а – неразъёмные сварные; б – разъёмные болтовые шинные; в - разъёмные для соединения круглого проводника 2 и шины 1; г – подвижные скользящие щёточные; д – подвижные роликовые. Коммутирующие контакты: е – мостиковые; ё – рычажные; ж – врубные; з – контакты с плоскими пружинами

Рекомендуемые удельные давления в контактных соединениях, МПа, в зависимости от материала соединения приведены ниже.

## Материалы соединения:

Медь лужёная .....	0,5...10,0
Медь, латунь, бронза нелужёная .....	0,6...12,0
Алюминий .....	25,0
Сталь лужёная .....	10,0...15,0
Сталь нелужёная .....	60,0

Болтовые соединения могут оказаться недостаточно надёжными, особенно при алюминиевых контактах. Поэтому в настоящее время алюминиевые токоведущие детали соединяются с помощью холодной или горячей (термитной) сварки, которые представляют после этого неразборный контакт. Такие соединения обладают высокой механической прочностью и хорошей проводимостью.

В болтовых соединениях контактные точки сосредоточены около отверстий для болтов, где металл деформируется пластически. Чтобы избежать пластической деформации, например, алюминиевых шин вследствие их малой прочности, и исключить порчу контакта, производят предварительный обжим, уплотнение шин, либо ставят под гайки пружинящие шайбы или специальные пружины.

Температура стягивания стальных болтов не превосходит 20 % температуры шин. Температурный коэффициент расширения у меди и алюминия значительно выше, чем у стали, поэтому шины, увеличиваясь по толщине больше, чем удлиняются болты, растягивают их. При этом деформация болтов может перейти за пределы упругости. Тогда после отключения цепи и остывания контакта из-за вытягивания болтов давление в контактах уменьшается, что приводит к увеличению сопротивления, сильному нагреву и последующему разрушению. Известно, что сопротивление контакта определяется числом болтов, их диаметром и материалом, и прочими факторами. Чем больше диаметр болта и выше предел прочности материала, тем больше давление в контакте и число контактных точек (при соответствующей затяжке болтов). Диаметр болтов выбирают в зависимости от размера полос, а число болтов – в пределах 1...6. Ши-

рокое применение получили стальные болты с пределом прочности при растяжении 200-250 МПа.

Однако чрезмерная затяжка болтов обуславливает появление остаточной деформации, которая способствует ослаблению давления в контакте. Для повышения надёжности контактных соединений под болты устанавливаются тарельчатые пружинные шайбы, компенсирующие температурные расширения материалов, и на необходимом уровне поддерживают давление в болтовом соединении.

Скользящие контакты: роликовые, щёточные, торцевые, розеточные, пальцевые и пружинящие предназначены для передачи тока с неподвижной части на подвижную без обрыва цепи тока. Они широко применяются в выключателях, разъединителях и других высоковольтных аппаратах.

Недостатком скользящего токосъёма (рис.10,г) является большая сила трения, которая требует значительной мощности проводного механизма. Уменьшается сила трения при роликовом контакте.

При больших номинальных токах применяются роликовые контакты (рис.10,д), обеспечивающие токосъём с неподвижных контакт-деталей (стержней) 1, переключаемых роликами 3, на подвижную контакт-деталь 2, образующих неподвижную контакт-деталь. Подвижный контакт 2 имеет возможность перемещаться поступательно. Ролики надеты на оси 4 и прижимаются к подвижному и неподвижному контактам пружинами 5. Переход тока с подвижного контакта на неподвижные происходит через ролики. Число роликов зависит от номинального тока и тока КЗ.

Преимущество роликовых контактов заключается в незначительных потерях на трение, недостаток – в плохой самоочищаемости контактных поверхностей. Этот тип контакта широко применяется в современной аппаратуре высокого напряжения.

Таким образом, соединительные контакты должны длительно допускать протекание токов нормального режима и кратковременных токов аварийных

режимов работы без повреждений в пределах срока службы всей электроустановки в целом.

Коммутирующие контакты могут находиться в замкнутом (соответствующая цепь включена) или разомкнутом (соответствующая цепь отключена) состоянии. Конструкции контактов чрезвычайно разнообразны. По своему назначению коммутирующие контакты в силовых аппаратах можно разделить на главные и дугогасительные. Главные, обычно, шунтируются дугогасительными. В процессе размыкания цепи главные контакты выходят из соприкосновения раньше, чем дугогасительные, а поэтому образование дуги происходит только на дугогасительных контактах. Главные оказываются защищёнными от воздействия дуги и служат для надёжного пропускания рабочих токов и токов КЗ в замкнутом состоянии. Часто функции контактов совмещаются так, что одни и те же контакты исполняют роль и токоведущих и дугогасящих контактов.

Наиболее типичные разновидности коммутационных (замыкаемых и размыкаемых) контактов, применяемых в аппаратах низкого напряжения, приведены на рис.10,е-з. Мостиковые (е), рычажные (ё) и врубные (ж) конструкции контактных узлов применяются, в основном, в аппаратах на большие номинальные токи (десятки ампер и выше). Контакты с плоскими пружинами (з) применяются, преимущественно, в маломощных аппаратах (коммутируемые токи до 5...10 А).

Рычажные контакты (рис.10,е) применяются в аппаратах с поворотной подвижной системой. Конструкция разрывных контактов определяется значениями номинального тока, номинального напряжения, тока КЗ, режимом работы, назначением аппарата. В рычажных контактах оси вращения контакта и подвижной системы не совпадают. Контакты касаются раньше, чем подвижная система достигает конечного положения, вследствие этого при замыкании и размыкании происходит перекачивание и проскальзывание подвижной контактной детали по неподвижной. В результате, начальная точка касания при замыкании, она же последняя точка касания и точка возникновения дуги при размыкании,

оказывается смещённой по отношению к точке конечного касания контактов. Таким образом, поверхности, обеспечивающие продолжительное проведение тока и определяющие переходное сопротивление контакта, отдалены от места возникновения дуги. Проскальзывание контактов при достаточном контактном нажатии приводит к стиранию оксидной плёнки и грязи с поверхности контакта, т.е. к самоочистке контактов. Это позволяет применять медь в качестве контактного материала.

Проскальзывание при той шероховатости, которую обычно имеют поверхности контактов (в особенности, работавших), вызывает дополнительный дребезг контактов при их замыкании, а, следовательно, и их повышенный износ. В связи с этим и появилась тенденция исключать или сводить к минимуму проскальзывание, сохраняя перекатывание.

Отказ от проскальзывания требует повышения контактного сжатия для обеспечения работы аппарата в продолжительном и прерывисто-продолжительном режимах. При полном отсутствии проскальзывания и недостаточно высоком нажатии следует ожидать высокого перегрева медных контактов за счёт постепенного окисления конечной контактной точки.

Рычажные контакты требуют гибкой связи для присоединения к токопроводу, но гибкая связь, в ряде случаев, является слабым местом контактной системы. Её трудно осуществить на большие токи: механическая износостойкость её оказывается ниже, чем других деталей.

Мостиковые контакты (рис.10,ё) применяются в аппаратах с прямоходной подвижной системой. Гибкая связь отсутствует, что является достоинством конструкции, но зато по сравнению с рычажными контактами требуется удвоенное контактное нажатие, так как удваивается число переходных контактов. Поэтому медные контактирующие детали здесь применяться не могут, а используются детали из серебра или металлокерамики на базе серебра.

Врубные контакты (рис.10,ж) на небольшие токи состоят из неподвижной контактной стойки 1, в которую входит подвижный контактный нож 2, направление движения которого показано стрелкой. Нажатие осуществляется за счёт

упругих свойств материала стоек, которым придаётся соответствующая форма. При нагреве, а также при частых включениях, пружинящие свойства губок ослабляются, и контакт нарушается. Для устранения указанного недостатка во врубных контактах на большие токи и для получения более высоких и устойчивых нажатий применяют стальные пружины.

Роликовые, врубные конструкции не могут отключать значительные токи. Возникающая при этом электрическая дуга нарушает контактные поверхности. На них появляются оплавления, контакт нарушается и резко возрастает усилие, необходимое для его включения и отключения. Для отключения значительных токов применяют параллельное включение дугогасительных контактов.

Основные требования, которым должны удовлетворять электрические контакты:

- малое электрическое сопротивление материала контакта и малое контактное электрическое сопротивление;
- незначительная эрозия (износ) контактов, связанная с разрушением контактной поверхности и с переносом металла с одного контакта на другой;
- отсутствие свариваемости при замыкании и размыкании контактов и склонности к образованию мостиков;
- термическая и химическая стойкость контактов; механическая стойкость контактов и высокая теплопроводность.

## **6. Работа и износ электрических контактов**

Условия работы и физические процессы, протекающие в электрических контактах, весьма разнообразны и сложны. Из таблицы 4 видно, что работа и износ коммутирующих контактов определяются конструкцией контактов, свойствами материала проводников и условиями, существующими во внешней среде и в электрической цепи, как при замкнутом положении контактов, так и при их разомкнутом положении, а также в процессе включения и отключения.

Рассмотрим влияние отдельных видов износа на состояние металлических контактов. Обычно под износом понимают потерю материала, например, перенос материала с анода на катод представляет собой износ анода, хотя это может быть приростом материала катода. В некоторых случаях будем отмечать перенос материала от общего износа, считая, что перенос – это такое явление, когда уменьшению материала на одном контакте соответствует такое же увеличение материала на другом. В отличие от переноса, под общим износом понимают потерю материала обоими контактами.

Отметим некоторые показатели, служащие мерой износа контактов. Износ конструкций контактных систем характеризуется уменьшением провала контактов. Под провалом понимают путь, пройденный точкой соприкосновения контактов (на подвижном контакте), если во включенном положении убран другой контакт. С уменьшением провала уменьшается сила контактного сжатия в замкнутом состоянии, увеличивается падение напряжения на контактах, растёт температура пятна касания, что выводит контакты из строя. Для оценки стойкости материала контакта износ измеряют потерей количества вещества (объёма или массы) на единицу количества электричества, прошедшего через межконтактный промежуток или на одну выполненную операцию “включение - отключение“. В последнем случае износ характеризует ещё и условия коммутации, существующие в данной цепи.

Кроме абсолютных оценок износа в цепях постоянного тока важной характеристикой является знак износа или знак переноса. Если больше изнашивается положительный электрод (анод), то переносу (износу) приписывается знак плюс, и наоборот. Заметим ещё, что если в межконтактном промежутке при размыкании зажигается дуга, то износ под действием дуги, обычно, превосходит все другие виды износа. Поэтому отдельно рассмотрим износ (эрозию) при малых токах (когда дуга отсутствует) и при больших токах (дуговой износ). Износ под действием механических факторов здесь не рассматривается, он, обычно, много меньше коммутационного. Виды износа, нарушающие работу контактов, обусловленных их свариванием, приведены в таблице 4.

Электрическая эрозия – явление локального характера, выражающееся в физико-химических изменениях на поверхности электродов. Они сопровождаются направленным выбрасыванием или переносом частиц металла и протекают под воздействием энергии, выделяемой в межэлектродном промежутке при прохождении по нему электрического тока. Электрическая эрозия контактов (мостиковая, дуговая, искровая) вызывает их износ или перенос материала с одного контакта на другой [6,10,14,15].

Электрическая эрозия контактов под действием малых токов определяется мостиковой стадией и стадией искрового разряда. Мостиковая эрозия в чистом виде наблюдается на размыкающихся контактах при условии отсутствия контактной дуги, т.е. она типична для контактов, используемых в слаботочных цепях. Как известно, контакты в замкнутом состоянии соприкасаются, обеспечивая металлический контакт не всеми точками поверхности. При размыкании контактов число этих точек сокращается и наступает момент, когда в отдельных точках контакта, из-за крайне ограниченного их числа, плотность тока нарастает, достигая нескольких тысяч ампер на квадратный сантиметр. В этих точках металл контакта плавится. Этот момент наступает, когда напряжение на контакте достигает величины напряжения плавления

$$U = \sqrt{8\theta\rho\lambda} . \quad (16)$$

Между контактами образуется капля жидкого металла, которая при дальнейшей раздвижке контактов переходит в жидкий мостик, соединяющий оба контакта. При достижении на мостике напряжения кипения металл мостика закипает (“взрывается”) и мостик обрывается. Чаще всего, как показывает опыт, мостики взрываются в зоне, расположенной вблизи анода (можно считать, что сам мостик состоит из металла анода и катода поровну). Наиболее склонны к образованию мостиков благородные, не окисляющиеся металлы и сплавы, а также некоторые неблагородные металлы в вакууме. Экспериментально установлено, что к образованию мостиков склонны такие металлы, как платина и металлы платиновой группы: никель, железо, золото, серебро и медь; сплавы с

золотом, иридием, молибденом и вольфрамом, палладия с серебром, иридия и серебра с золотом и палладием.

Мостиковая эрозия бывает двух форм: симметричная с одинаковым диаметром у анода и катода и несимметричная – с утолщением у одного из электродов. В последнем случае, вследствие несимметрии разрыва, большая часть металла из мостика переходит на катод, т.е. износу подвергается только анод (мостиковый перенос в данном случае имеет знак плюс).

Объём мостиковой эрозии в контактах из одинакового материала за одно отключение цепи рассчитывается по формуле

$$V_0 = K_{\text{э}} I^3, \quad (17)$$

где  $V_0$  - объём,  $I$  – ток,  $K_{\text{э}}$  – постоянная.

Величина  $K_{\text{э}}$  для некоторых металлов равна:

Золото .....	$4,42 \cdot 10^{-14}$	Серебро .....	$6,75 \cdot 10^{-14}$
Платина .....	$5,63 \cdot 10^{-14}$	Палладий .....	$5,32 \cdot 10^{-14}$

Мостиковая эрозия, согласно тепловой теории, обусловлена тепловой асимметрией мостика из-за туннельного эффекта в стадии проводимости до размыкания контактов, когда анод больше, чем катод. В случае разнородных материалов катода и анода можно подбором их теплофизических параметров компенсировать температурную асимметрию мостика и снижение эрозии, т.е. можно создать условия для самоограничивающегося переноса металла. Однако когда катод и анод состоят из одного и того же материала и имеют одинаковые теплофизические константы, нельзя избежать мостикового переноса вследствие неодинакового температурного режима катода и анода и различных для них средних температур за время процесса размыкания контактов.

Виды износа и факторы, влияющие на износ [3,13]

Вид износа	Внешние факторы, вызывающие износ	Характерные признаки повреждения	Свойства материала контактов, влияющие на износ
1	2	3	4
Механический	Контактное нажатие, кинетическая энергия удара контактов при замыкании. Проскальзывание при	Расплющивание, растрескивание, истирание контактов	Твёрдость. Прочность на удар и сжатие. При скольжении – прочность на сдвиг. Модуль упругости. Коэффициент трения. Постоянное свойство до 300 <sup>0</sup> С

Таблица 4 (продолжение)

1	2	3	4
<p>Коррозия: - атмосферная;</p> <p>- дуговая.</p> <p>Сваривание: - горячее;</p> <p>- холодное.</p>	<p>Температура и влажность среды. Наличие химически активных примесей, наличие микро- и макрогальванических пар. Наличие пыли и органических испарений</p> <p>Подвижность дуги</p> <p>Контактное давление. Плотность тока. Энергия дуги</p> <p>Контактное давление. Кинетическая энергия при замыкании</p>	<p>Образование непроводящих плёнок</p> <p>Образование непроводящих плёнок. Обгар контактов</p> <p>Временное или длительное короткое замыкание</p> <p>“Слипание” контактов</p>	<p>Электромеханический потенциал. Средство к кислороду и сере. Микроструктура</p> <p>Средство к кислороду, азоту. Термическая стойкость плёнок. Электрическая и механическая прочность плёнок. Толщина и структура плёнок</p> <p>Температура и напряжение плавления. Тепло- и электропроводность. Твёрдость</p> <p>Твёрдость, предел текучести, модуль упругости. Температура плавления и рекристаллизации (размягчения). Окисляемость</p>

При искровом разряде знак переноса, обычно, положительный. Величина эрозии пропорциональна количеству электричества, прошедшего через контакты за время искры. Общее выражение, отражающее процесс этого вида износа контактов, имеет вид

$$G = \gamma_{II} \cdot q, \quad (18)$$

где  $q$  – количество электричества;  $\gamma_{II}$  - коэффициент, характеризующий данный материал.

Снижение эрозии стадии искрового разряда может быть достигнуто за счёт применения эрозионно-устойчивых материалов, а также за счёт шунтирования контактов искрогасительными (активно-ёмкостными) цепочками.

Важным фактором, влияющим на износ контактов коммутационных аппаратов, является другая разновидность эрозии – дуговая эрозия, возникающая при размыкании контактов, когда в межконтактном промежутке существует электрический разряд в газовой среде, обычно содержащий также то или иное количество паров металла.

Итак, когда ток и напряжение между размыкающимися контактами лежат выше предела дугообразования, между ними возникает дуга.

Дуга размыкания уничтожает следы переноса металла, являющегося результатом образования мостиков, и резко меняет весь характер эрозии. При зазоре между контактами больше  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  см между ними образуется слой плазмы из-за попадания в зазор паров металла и воздуха и ионизации их первичными электронами. В результате образуется дуга с катодным падением, вследствие чего катод бомбардируют положительные ионы, вызывающие испарение материала, а анод – медленные электроны. При этом происходит грубый перенос металла с катода на анод. В результате теоретического сравнения количеств испаряющегося материала катода в дуге и тлеющем разряде при одинаковой затрате энергии сделан вывод, что оба процесса идентичны, и что, следовательно, эрозия катода в маломощной дуге определяется не только термическими процессами на катоде. При расстоянии между контактами равного пути свобод-

ного пробега электронов образуется “короткая дуга” с одним только катодным падением и настолько тонким слоем плазмы, что многие первичные электроны свободно проходят её, разрыхляя анод. Металл переносится с анода на катод, образуя “тонкий” перенос металла. Таким образом, длинная или “световая” дуга с катодным и анодным падениями и положительным столбом (плазмой), наблюдающаяся, главным образом, при размыкании контактов, вызывает эрозию катода и грубый перенос, тогда как короткая дуга с одним катодным падением вызывает эрозию анода и тонкий перенос металла.

В отличие от чисто мостикового переноса, не зависящего от индуктивности, тонкий перенос, обусловленный короткой дугой (беспламенной), увеличивается с индуктивностью цепи. Короткая дуга наблюдается как при размыкании, так и при замыкании контактов. В последнем случае короткая дуга возникает вследствие пробоя контактного промежутка и автоэлектронной эмиссии с поверхности катода благодаря высокому градиенту поля в промежутке в момент, предшествующий непосредственному соприкосновению контактов.

Дуговая эрозия контактов непосредственно связана с энергией, выделяющейся на контактах дугой, которую можно определить уравнением

$$W = \kappa(U_k + U_a) \cdot \int_0^t i(t) dt, \quad (19)$$

где  $U_k$  и  $U_a$  - катодное и анодное падения напряжения;  $t$  – время горения дуги.

Степень износа контактов за одну операцию отключения зависит от значения тока дуги, длительности её горения, скорости перемещения дуги по поверхности контактирования, материала контактов и конструктивных особенностей аппарата. При больших отключаемых токах и сравнительно редких операциях общий износ находится в прямой зависимости от числа отключений.

Количество вещества, теряемое в дуговой стадии эрозии, может в 5...20 раз превышать количество материала контактов, переносимое в мостиковой стадии.

Механизм дугового износа зависит от значений тока и частоты срабатывания. Следует иметь в виду, что в аппаратах высокого напряжения в процессе эрозии контактов значительную роль играет и дуга включения, возникающая на контактах при их сближении под действием напряжения цепи. При размыкании контактов коммутационных аппаратов наблюдается дуговой износ, вызываемый явлением дребезга (вибрации) контактов. В ряде случаев он превосходит износ при размыкании.

Снижение дребезга контактов при замыкании и их замыкании без дребезга, может достигаться за счёт увеличения начального нажатия и жёсткости пружины, уменьшения массы подвижных контакт-деталей и скорости их замыкания. Для этих целей применяют также искусственные меры, основанные, главным образом, на компенсации отбрасывающих усилий, возникающих при соударении контактов. Существуют и другие способы снижения износа при замыкании контактов. В таблице 5 приведены свойства материала, которые способствуют уменьшению износа электрических контактов.

Износ  $m$  пары контактов при совершении ими  $N$  операций включения и отключения цепи с током  $I$  определяется формулой Р.С. Кузнецова [10]:

$$m = 10^{-9} K_{II} N I^2, \quad (20)$$

где  $K_{II}$  - эмпирический коэффициент износа, г/А<sup>2</sup>.

Коэффициент износа  $K_{II}$  в диапазоне токов 1...500 А имеет разброс 0,1...5. В области токов до 100 А величина  $K_{II}$  зависит от тока отключения. Для различных материалов при токах 100...200 А весовой износ считают пропорциональным только первой степени тока. Величина  $K_{II}$  при токах выше 400А стремится к постоянному значению для различных материалов, т.е. суммарный износ на пару контактов становится пропорциональным квадрату тока. Относительная дугостойкость различных металлов может быть оценена на основании диаграммы (рис.11), построенной по результатам опытов с корот-

Свойства материала, способствующие износостойкости контактов [3,13]

С в о й с т в а м а т е р и а л а				
Электрофизические	Механические	Термические	Электрохимические	Структурные
Высокая электро- и теплопроводность. Высокие параметры дуги. Высокие значения работы выхода электронов и потенциала ионизации. Коэффициент Томпсона, близкий к нулю. Угол смачивания, близкий к нулю. Высокое поверхностное натяжение в жидком состоянии. Малый атомный объём, термоЭДС в паре с медью и алюминием	Высокая твёрдость. Высокие пределы прочности при сжатии и сдвиге. Умеренный модуль упругости. Умеренная пластичность. Низкий коэффициент трения	Высокая температура (напряжение) рекристаллизации, плавления, кипения, сублимации. Высокая теплоёмкость, скрытая теплота плавления, испарения, сублимация. Низкая упругость пара при температурах дуги	Высокий электродный потенциал. Малое химическое сродство с компонентами среды. Высокая упругость диссоциации продуктов коррозии. Малая механическая и электрическая прочность плёнок – продуктов коррозии	Простой тип кристаллической решётки. Для сплавов – структура твёрдого раствора. Для композиций – тонкодисперсное распределение фаз. Ориентировка кристаллов по направлению теплового и электрического потоков

кой дугой (0,8 мм) при токе 12 кА и продолжительностью его протекания 0,0085с.

Химический износ (коррозия) контактов определяется их электрохимическими и химическими свойствами, как при обычной, так и при высокой температуре электрической дуги. При атмосферной коррозии имеет значение электродный потенциал, который в среде, соответствующей условиям работы контактов, по величине и знаку должен приближаться к благородным металлам. При обычной и высокой температурах металлы должны иметь минимальное сродство к компонентам окружающей среды. Если на контактах образуются плёнки продуктов коррозии, то они должны обладать малой термической стойкостью, а также легко разрушаться механически или пробиваться электрически во избежание нарушения контактной проводимости.

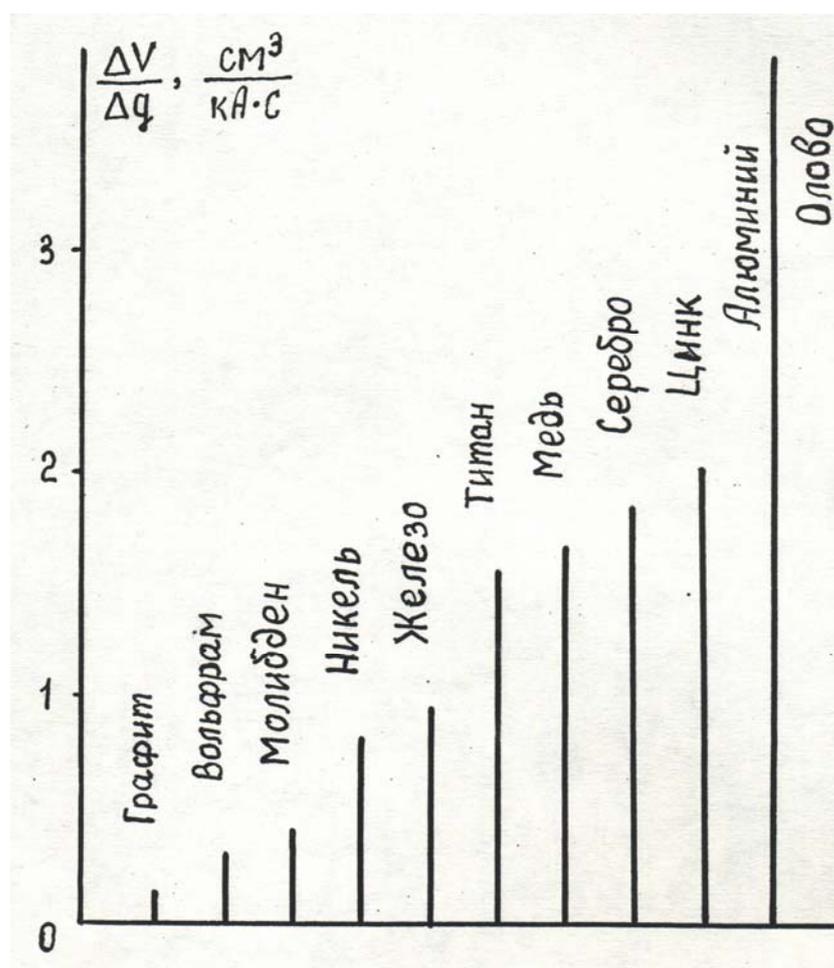


Рис.11. Отношение объёма эрозии к количеству электричества в дуговой стадии для различных контактных материалов

## 7. Материалы электрических контактов

Явления на электрических контактах позволяют описать основные требования к материалам контактов современных электрических аппаратов. От материала контакта в сильной степени зависят его срок службы и надёжность работы. Требования к материалам контактов довольно противоречивы. Они определяются условиями их работы в разных режимах. Материал контактов должен иметь высокую электрическую проводимость и теплопроводность. Тогда выделяемая в замкнутом контакте тепловая мощность уменьшается, а условия теплоотвода улучшаются. Это приводит к снижению температуры и интенсивности образования окислов на поверхности контактов.

Размеры расплавленного металлического перешейка, образующегося между контактами в начальной стадии их размыкания, также сокращаются, снижая интенсивность мостиковой эрозии. Хороший теплоотвод препятствует нагреву и испарению металла дугой. Наконец, в режиме восстановления электрической прочности, когда протекание тока по контактам практически уже прекратилось, хорошие условия теплоотвода от нагретых оснований дуги способствуют повышению восстанавливающейся прочности приэлектродных участков.

Высокая температура рекристаллизации материала уменьшает вероятность холодного сваривания контактов. Повышенные теплостойкость, температура плавления и кипения, скрытая теплота плавления и испарения, как факторы, влияющие на объём расплавленного и испаряющегося материала контактов, способствуют уменьшению их износа. Снижение температуры нагрева оснований дуги и повышение температуры плавления и испарения способствуют уменьшению количества паров металла в газоразрядном промежутке, повышая эффективный потенциал ионизации газоразрядной среды и уменьшая её электрическую проводимость. При этом, улучшаются условия гашения дуги и восстановления электрической прочности. Поэтому, материал контактов должен иметь более высокий потенциал ионизации.

Увеличение работы выхода электронов снижает интенсивность эмиссии электронов с поверхности материала в газоразрядный промежуток.

В пористом контактном материале под действием дуги могут образовываться очаги скопления паров, которые приводят к локальным взрывам и повышенному износу. Поэтому целесообразно, чтобы контактный материал имел высокую плотность, способствующую при эрозии и переносе металла уменьшению масштаба объёмных изменений в контакте.

Износостойкость контактного материала повышается, если его кристаллическая решётка обладает высокой прочностью. Однако чрезмерный твёрдый материал при реальных силах контактного нажатия в аппаратах имеет уменьшенные размеры контактирующих микроплощадок и повышенное переходное сопротивление. Слишком упругий материал плохо прирабатывается при замыкании контактов и, наоборот, на пластинчатом материале более выражены местные деформации в контактах и, как следствие, их повышенный механический износ. Если материал обладает повышенной упругостью, то при их смыкании возникает повышенная вибрация, которая увеличивает электрический износ контактов, вибрирующих под током. Для скользящих контактов целесообразны материалы с малым коэффициентом трения. Контактный материал должен быть устойчив по отношению к компонентам окружающей среды: кислороду, азоту, сере, углероду и др. Коррозия металла должна быть минимальной. Поэтому он должен иметь минимальное химическое сродство к компонентам окружающей среды. Образование плёнок химических соединений на контактах нежелательно, так как они термически нестойки, и при нагреве и механическом воздействии разрушаются, а также пробиваются при сравнительно небольшом напряжении. Кроме указанных требований, контактный материал должен обладать хорошими технологическими свойствами: обрабатываемость в холодном и горячем состояниях, способность к пайке и приварке к материалу контактодержателей, а также быть не дефицитным и не дорогостоящим.

Если перечисленные требования к контактным материалам сопоставить со свойствами реальных металлов и их сплавов, можно убедиться, что в одном

материале невозможно сочетать все требования. Физические свойства материалов взаимосвязаны нередко так, что улучшение одних качеств приводит к ухудшению других. Для улучшения интегральных характеристик контактного материала следует стремиться к:

- максимальному повышению электрической проводимости, теплопроводности, температуры рекристаллизации, плавления, кипения; скрытой теплоты плавления и испарения; работы выхода электронов и потенциала ионизации;
- умеренному увеличению плотности, твёрдости и упругости;
- максимальному уменьшению упругости паров металла, коэффициента трения, термо-ЭДС, коэффициента Томсона, угла смачивания жидким металлом, термической и механической прочности поверхностных плёнок и др.

В качестве контактных материалов используются:

- чистые материалы: медь, алюминий, серебро, золото, платина, палладий, радий, олово, вольфрам, молибден, кадмий и др.;
- сплавы: латунь, бронза, силумин, бериллиевая и кадмиевая бронза и др.;
- неметаллы (углерод);
- композиции взаимно не сплавляемых металлов: вольфрам-серебро, вольфрам-медь;
- композиции металлов с оксидами металлов: серебро-оксид кадмия, серебро-оксид меди, медь-оксид меди;
- композиции металлов с карбидами: вольфрам-карбид вольфрама;
- композиции металлов с углеродом: серебро-графит, медь-графит;
- многочисленные тройные композиции.

Области токов, в которых применяются основные металлы, используемые для электрических контактов, приведены на рис.12.

Свойства, технология и рекомендации по применению разных контактных металлов, сплавов и композиций в связи с условиями их работы подробнее рассмотрены в книге [2,4,10].

В конструктивном отношении удобнее изготавливать контакт-детали из того же материала, что и токопровод. Поэтому часто контакты изготавливают из ме-



Рис.12. Области применения основных материалов для электрических контактов

ди. Если токопровод алюминиевый, то контакты изготавливают из алюминия. Однако если медь может использоваться не только в соединительных, но и коммутирующих контактах, то алюминий обладает столь малой износостойкостью и так легко окисляется, что его применение ограничивается соединительными контактами.

Ограничение окисления и образования плохо проводящих оксидных, сульфидных и других плёнок потускнения, в особенности для контактов различных аппаратов автоматики, достигается использованием благородных металлов. Снижение влияния плёнок оксидов на электрические параметры контактов, через которые протекают большие токи, достигается покрытием поверхности контакт-деталей слоем олова, которое менее подвержено окислению, чем медь, и мягче её.

Металлооксидные композиции используют при предъявлении к контактам повышенных требований в отношении сваривания. С этой же целью используются металлографитные композиции. При выборе контактных материалов необходимо учитывать, что не все свойства материала реализуются в одинаковой мере в различных аппаратах. Некоторые требования к контактам являются столь важными, что при выборе материала приходится пренебрегать заведомо плохими свойствами.

В некоторых случаях к контактам предъявляют особо жёсткие требования в отношении свариваемости. Они возникают при создании защитных аппаратов, предназначенных для отключения больших токов КЗ, для работы в производстве, где номинальные токи могут быть более 10 кА. В таких условиях целесообразнее применение жидкометаллических контактов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хольм Р. Электрические контакты.-М.: Изд-во иностр.лит,1961.- 464 с.
2. Бойченко В.И., Дзекцер Н.Н. Контактные соединения токоведущих шин.-Л.: Энергия, 1978.- 144 с.
3. Мерл В. Электрические контакты.- М-Л.: Госэнергоиздат, 1962.- 72 с.
4. Бредихин А.Н., Хомяков М.В. Электрические контактные соединения.- М.: Энергия, 1980.- 168 с.
5. Домкин Н.Б. Контактное покрытие шероховатых поверхностей. - М.: Наука, 1970.- 227 с.
6. Электрический справочник в 3-х т. Т.2. Электротехнические устройства. Под общ. ред. проф. МЭИ В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова и др. – М.: Энергоиздат, 1981.- 640 с.
7. Ким Е.И., Омельченко В.Г., Харин С.Н. Математические модели тепловых процессов в электрических контактах.- Алма-Ата: Наука, 1977.- 236 с.

8. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. – М.: Энергия, 1977.- 328 с.
9. Залесский А.М., Куkenов Г.А. Тепловые расчёты электрических контактов. –Л.: Энергия, 1967.- 380 с.
10. Основы теории электрических аппаратов. Под общ. ред. И.С. Таева. –М.: Высшая школа, 1987.- 352 с.
11. Брон О.Б. Электрические аппараты с водным охлаждением. –Л.: Энергия, 1967.- 264 с.
12. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. – М.: Высшая школа, 1967.- 195 с.
13. Усов В.В. Металловедение электрических контактов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.- 208 с.
14. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. – М.: Энергия, 1978.- 456с.
15. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов./ Г.В. Буткевич, Г.С. Белкин, Н.А. Ведешенков, М.А. Жаворонков. – М.: Энергия.1978.-256 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Контактная поверхность .....	3
2. Сопротивление электрических контактов .....	8
3. Нагрев контактов в режиме длительного протекания номинального тока .....	16
4. Особенности работы контактов в режиме протекания тока короткого замыкания .....	22
5. Основные конструкции твёрдометаллических контактов .....	29
6. Работа и износ электрических контактов .....	35
7. Материалы электрических контактов .....	46
8. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	50