

УДК. 621.316

Т. П. ПАВЛЕНКО, д-р. техн. наук, профессор

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
(г. Харьков, E-mail: khpavlenko@yandex.ru)

РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ В ПРИКАТОДНОЙ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

В данной работе рассматриваются упрощенные физические модели исследования процессов и явлений, происходящих на рабочей поверхности электрических контактов и в прикатодной области

У даній роботі розглядаються спрощені фізичні моделі дослідження процесів та явищ, що відбуваються на робочій поверхні електричних контактів та в прикатодній області.

Введение

Электрические аппараты применяются для включения, управления и защиты электрических цепей при токах короткого замыкания и перегрузок. При работе коммутационных электрических аппаратов контакты подвержены механическому и электрическому износам, вызывающим эрозию их рабочих поверхностей. Кроме того, основной вклад в развитие эрозии рабочей поверхности электрических контактов, вносит электрическая дуга, которая образуется в межконтактном промежутке при расхождении контактных пар, а также процессы и явления, возникающие при развитии дугового разряда и повышения температуры. Проблемы, возникающие при работе электрических контактов в коммутационных электрических аппаратах, а также процессы, происходящих как внутри, так и на рабочей поверхности электрических контактов требуют создания композиций, которые обеспечивали бы не только повышенные значения электро- и теплопроводности, но также и повышенную их дугостойкость.

Одним из путей повышения дугостойкости электрических контактов является решение создания композиций с особыми термоэмиссионными свойствами [1 – 3]. Новое решение способствует уменьшению эрозии рабочей поверхности за счет активирования состава композиции по всему объему, что приводит к увеличению термоэмиссионной активности поверхности из-за уменьшения работы выхода электронов. Процесс активирования, основан на развитии теории энергетических процессов и энергии взаимодействия частиц с применением основных положений квантостатистической теории твердого тела.

Основным направлением исследования было определение элементов с высокой термоэмиссионной активностью таких как: серебро (*Ag*), никель (*Ni*), и активная составляющая, которая никогда не использовалась в составах композиций электрических контактов. Изучение свойств и совместимости этих элементов, имеющих кристаллическое строение, проводилось с применением комплексных методов исследования на основе теоретических положений, связанных с физикой твердого тела, термодинамикой, металловедением, химией и др. науками.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования составов композиций контактов, с перечисленными выше элементами, показали, что процессы и явления, происходящие на их рабочей поверхности и внутри самих композиций, взаимосвязаны между собой и происходят, практически, одновременно. Поэтому, невозможно их рассматривать поодиночке, а тем более давать им конкретную оценку. Рассмотрение процессов должно быть избирательным, но таким образом, чтобы не упустить основные моменты. Например, как выяснилось, основной величиной, которая определяет все происходящие процессы и явления, является энергия. Развитие энергетических процессов подчиняется законам распределения частиц на определенном энергетическом уровне, что определяет квантостатистическая теория. Но всю теорию рассмотреть практически

невозможно. Из данной теории достаточно ограничиться рассмотрением вопроса развития эмиссионных процессов при изменении различных факторов.

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований [1, 2, 4 – 6], подтвердили, что подбор элементов для составов композиций электрических контактов коммутационных электрических аппаратов, необходимо начинать с изучения их свойств, основанных на квантово–статистической теории, кинетики химических реакций и фазовых превращений, развития процессов диффузии, тепловых и дуговых.

Цель работы

Определение процессов, происходящих на рабочей поверхности электрических контактов и факторов, способствующих повышению их дугостойкости, а также механизма перемещения основания дуги по рабочей поверхности электрических контактов.

Основные положения и результаты исследований

Физические процессы в прикатодной области

При изучении эмиссионных свойств составов композиций электрических контактов при их создании преобладает комплексный подход. Рассмотрим процессы на катоде и в катодной области, т.к. считается, что именно катод подвержен большему износу, чем анод.

Интенсивное развитие эмиссионных процессов начинается с развития дугового разряда, который проходит несколько этапов от момента возникновения тлеющего, искрового разряда, обусловленного лавинным потоком заряженных частиц с поверхности электрических контактов, до момента образования полноценного дугового столба электрической дуги.

Опуская подробности об этапах развития дугового столба, определим процессы в прикатодной области электрического контакта, т.к. эта область определяет интенсивность эмиссионных процессов (рис. 1) и является основным поставщиком электронов в зону газового разряда электрической дуги.

Условно площадь распределения частиц делится на слои, в которых отражены участки процессов, определяющие возникновение дугового разряда. При повышении температуры энергия электронов на поверхности катода и внутри кристаллической решетки резко возрастает, а значит, они могут преодолеть потенциальный барьер (уровень Ферми) и выйти за пределы поверхности катода электрического контакта. Двигаясь к аноду, электроны сталкиваются с нейтральной частицей. Если энергии электронов достаточно для ионизации данной частицы, то при столкновении образуются положительные частицы – ионы, которые стремятся к катоду контакта. Но т.к. ионы имеют большую массу, чем электроны, а значит, они обладают и меньшей скоростью. Поэтому первый слой (область на поверхности катода) содержит избыточный положительный пространственный заряд, образованный малоподвижными ионами, который вызывает скачок потенциала у поверхности катода электрического контакта (катодное падение напряжения).

Под действием температуры извне электроны продолжают эмитировать с катода электрического контакта и приобретают при этом дополнительную энергию, необходимую для возбуждения и процесса ионизации во втором слое (прикатодная область). В результате повышается степень ионизации, а также увеличивается концентрация частиц по всей длине второго слоя, постепенно приближаясь к границе столба дуги, где устанавливается их равновесие.

Но за счет скачка потенциала увеличивается скорость ионов, которые движутся к катоду электрического контакта. В результате, доходя до поверхности катода, ионы нейтрализуются ионами состава композиции электрических контактов, обеспечивая необходимую температуру эмитирующей поверхности. Поэтому во втором слое происходит перераспределение потока ионного тока, что снижает степень ионизации, т. к. доля ионного тока в прикатодной области существенно выше, чем в столбе дуги.

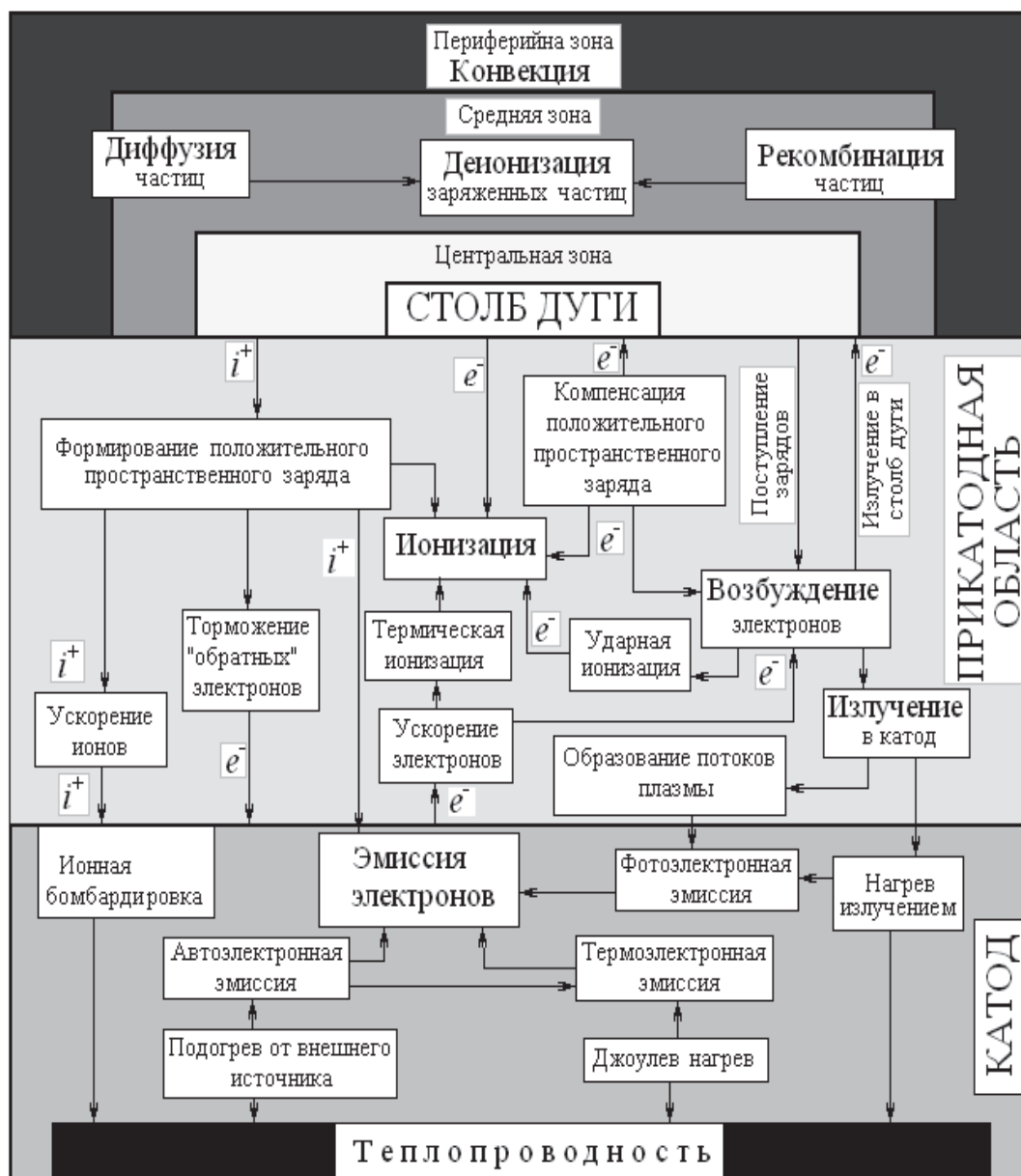


Рис. 1. Упрощенная схема физической модели явлений в прикатодной области

Кроме того, из второго слоя в первый поступают не только ионы, но и так называемые «обратные» электроны. Такие электроны образуются из-за тормозящего действия электрического поля у поверхности катода электрического контакта. В результате такого действия поля, эти электроны не смогли преодолеть потенциальный барьер и вернулись обратно на поверхность катода электрического контакта. Полный ток разряда определяется суммой токов за счет эмиссии ионов и «обратных» электронов.

Нагрев эмитирующей поверхности катода осуществляется за счет бомбардировки ионов, потока «обратных» электронов, излучения потоков плазмы и джоулева тепловыделения из-за нагрева от внешнего источника.

За счет процессов термоэлектронной и автоэлектронной эмиссий, а также под влиянием явлений возбуждения и ионизации электроны поступают в газоразрядный столб дуги. Столб дуги характеризуется высокой температурой и плотностью тока, которые зависят от распределения частиц. Кроме того, столб дуги также имеет свои зоны в зависимости от условий проводимости и степени ионизации частиц. Напряженность электрического поля в столбе дуги и давление практически не изменяются.

Охлаждение катода электрического контакта происходит за счет процесса теплопроводности и процессов деионизации (рекомбинации и диффузии).

Таким образом, на основании данной модели определено развитие процессов эмиссии, связанных с выделением энергии, где показаны процессы распределения и образования заряженных частиц на рабочей поверхности катода электрического контакта и взаимодействие их под влиянием различных факторов.

Факторы, определяющие дугостойкость контактов

Для определения работоспособности электрических контактов с особыми термоэмиссионными свойствами были проведены теоретические исследования всех возможных свойств элементов, входящих в составы экспериментальных композиций. Исследование элементов, проводилось на основе справочных данных с учетом их физико-химических свойств и основных параметров, которые способствуют изменению фазового состава за счет химических реакций, что определяет их совместимость [7–8]. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований было определено, что основными факторами, вызывающими повышенную дугостойкость электрических контактов являются (рис. 2) [1–8]:

1. Активированный состав композиции электрических контактов имеет три составляющие с разными работами выхода. Поэтому, рабочая поверхность электрических контактов имеет «пятнистый» вид. На участках с малой работой выхода поле пятен отбрасывает эмитируемые электроны обратно, а на участках с большой работой выхода ускоряет электроны, вышедшие в окружающее пространство.

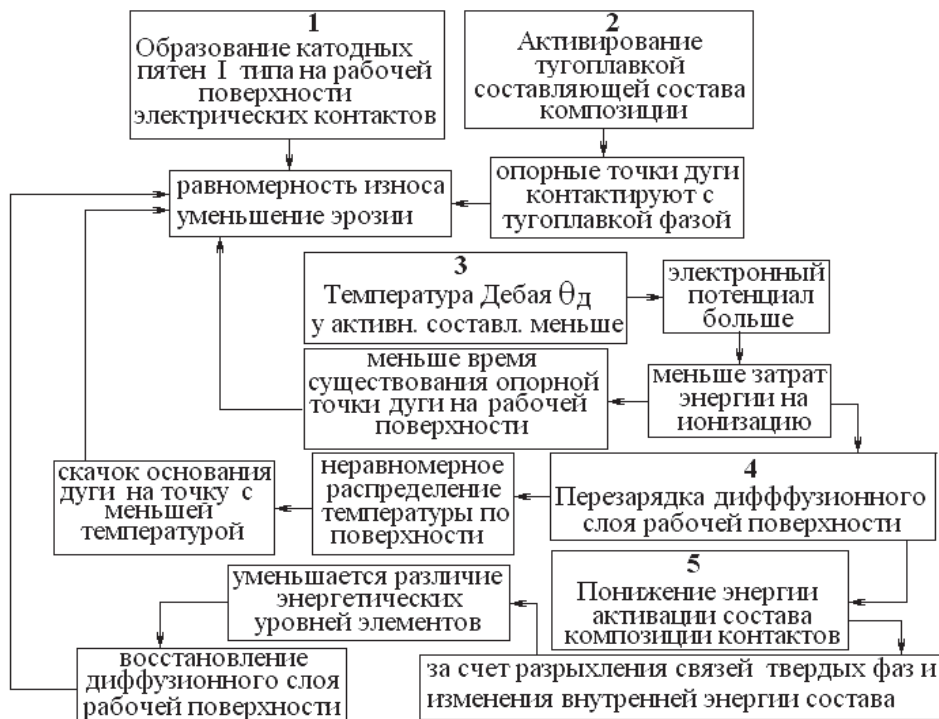


Рис. 2. Факторы, определяющие дугостойкость композиций электрических контактов

В результате на рабочей поверхности электрических контактов восстанавливается баланс энергий, что и приводит к уравниванию параметров в соответствии с температурой, эмиссионным током и напряженностью поля, скоростью и временем существования опорной точки электрической дуги на рабочей поверхности контактов. Поэтому, результаты эксплуатационных испытаний показали, что на рабочей поверхности электрических контактов образуются пятна I рода, которые приводят к уменьшению износа, а соответственно и к уменьшению эрозии.

2. У полученных составов контактной композиции активируется тугоплавкая

составляющая, а именно никель, т. к. радиус атома активной составляющей больше, чем у никеля и серебра, и по своим свойствам активная составляющая лучше контактирует с никелем, чем с серебром [7–8]. В результате опорные точки дуги в основном останавливаются на участках с образованными тугоплавкими фазами, а участки с серебром не подвергаются расплавлению. Поэтому рабочая поверхность электрических контактов имеет равномерный износ с мелкоточечным рельефом.

3. Электронный потенциал у активных составляющих больше, по сравнению с серебром и никелем [7–8]. Поэтому при повышении температуры активные составляющие легче отдают электроны, а значит требуется меньше затрат энергии на ионизацию. Кроме того, температура Дебая θ_D [7–8] активных составляющих меньше, что говорит о незначительном времени существования опорной точки дуги на рабочей поверхности и поэтому она перескакивает на рядом стоящую точку, которая приобретает свой потенциал ионизации.

4. Развивающиеся процессы ионизации и деионизации вместе с процессами диффузии, рекристаллизации и т.п. приводят к перезарядке диффузионного слоя дугового разряда на рабочей поверхности электрических контактов. Процессу перезарядки способствует наличие дискретной эмиссионной структуры состава композиции электрических контактов. В результате данной структуры распределение температуры на рабочей поверхности неодинаково, что способствует снижению температуры в зоне опорных точек дуги, и при этом происходит скачок основания дуги на менее разогретую точку активированной рабочей поверхности электрических контактов. Данный процесс объясняет модель, показанная на рис. 3.

Образование дугового разряда сопровождается возникновением потоков плазмы с высокой температурой T на поверхности катодных пятен.

Катодные пятна имеют различную конфигурацию, площадь, и глубину проплавления, из которой выходят электроны, с определенным уровнем энергии E . Допустим, основания потоков плазмы появились в точке 1. Температура в данной точке начинает увеличиваться, а вместе с температурой растет энергия электронов. Поток электронов за счет энергии преодолевает потенциальный барьер и выходит в дуговое пространство. В результате рассеяния и распределения электронов и за счет процессов ионизации, нейтрализации, спинового обмена и т.д., температура в этой точке падает, и соответственно, энергия уменьшается.

Основания потоков плазмы перескакивают в точку 2 и т.д. процесс повторяется. Время существования основания потоков плазмы зависит от работы выхода электронов элементов. А поэтому необходимо, чтобы состав элементов композиции имел незначительную работу выхода электронов, что способствует увеличению скачков основания потоков плазмы и опорных точек дуги по рабочей поверхности электрических контактов.

5. Понижение энергии активации объясняется наличием разрыхленных связей твердых фаз внутри состава композиции электрических контактов, за счет температуры и изменения внутренней энергии. В результате уменьшается различие энергетических уровней элементов составов композиций. За счет процессов диффузии происходит выход на поверхность активных элементов состава, в результате чего происходит восстановление диффузионного

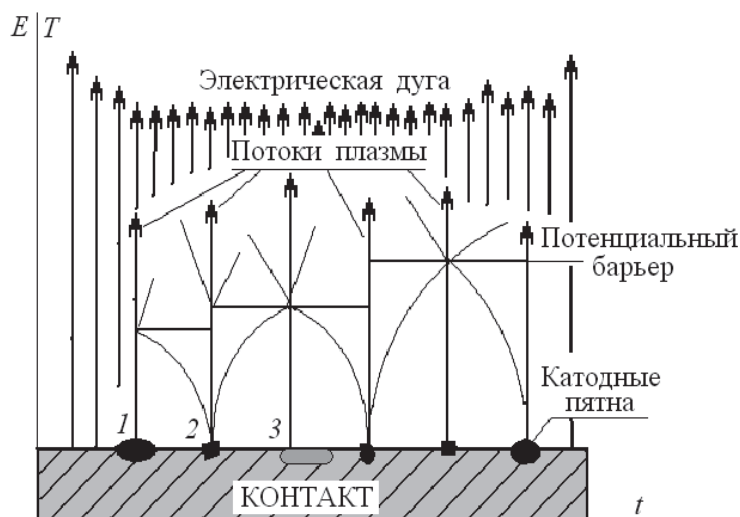


Рис. 3. Модель процессов в прикатодном слое поверхности электрических контактов.

слоя поверхности электрических контактов. Процесс перезарядки завершается.

Механизм перемещения основания дуги по рабочей поверхности контактов.

Эрозия катода электрических контактов определяется совокупностью катодных процессов, а также скоростью испарения с рабочей поверхности состава композиции, окисления, диффузии, газовой выделению и других видов химического взаимодействия с окружающей средой. По этим вопросам, в основном, имеются не только качественные представления, но и многочисленные эксперименты [1–6, 9, 10], подтверждающие данные процессы. В химическом отношении активизирующие составляющие являются стойкими соединениями, и в твердом состоянии с никелем и серебром сплавов не образуют [7–8]. На возможность протекания фазовых превращений влияет процесс диффузии, происходящий с очень большой скоростью в зависимости от температуры и термоэмиссионных свойств составов композиций электрических контактов.

Особенностью исследуемых контактных композиций с особыми термоэмиссионными свойствами является то, что активная составляющая композиции электрических контактов распределена не только по поверхности, а по всему ее [1–6, 9, 10]. Поэтому, после равномерного выгорания верхнего микрослоя состава, происходит как бы “подпитка” активных элементов изнутри, за счет дислокации атомов, диффузионных процессов и внутренней энергии системы. В результате, на рабочей поверхности контактов постоянно присутствуют активные и активированные составляющие композиции, что способствует равномерному и незначительному износу рабочей поверхности контакта (рис. 4.).

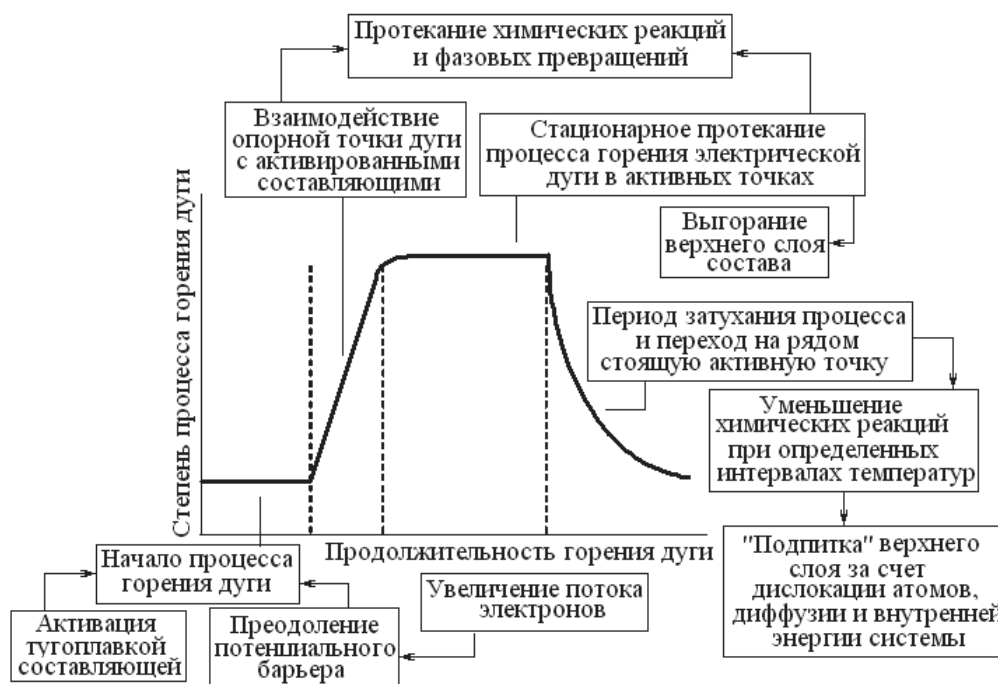


Рис. 4. Модель механизма возникновения и перемещения опорной точки дугового разряда

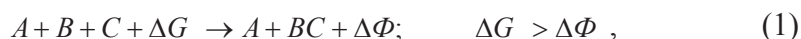
В основе развивающихся процессов лежат химические реакции, в которых процессы индукции и затухания протекают различным образом. Степень превращения в период индукции повышается обычно круто с началом данной реакции, или же напротив, очень медленно. Наклон кривой зависит от вида химической реакции и от температуры.

Если опорная точка дуги попадает на не активированный участок состава композиции электрических контактов, то наблюдается или незначительное фазовое превращение состава композиции, или оно совсем не происходит. Если опорная точка дуги попадает на активированную составляющую, то химическая реакция фазового превращения усиливается за счет дополнительной энергии.

За индукционным периодом следует период стационарного течения реакции, соответствующий определенным интервалам температур в зоне привязки опорной точки дуги к поверхности, что приводит к равномерному выгоранию состава композиции на рабочей поверхности.

После выгорания активированного слоя состава композиции электрических контактов активность химической реакции, а вместе с ней скорость и температура резко падают. В результате опорная точка дуги перескакивает на другую точку. Особенности протекающих химических реакций являются:

– превращения фазового состава с положительной свободной энтальпией, (исходя из законов термодинамики), которые произвольно не происходят. Протекание химических реакций обусловлено выделением свободной энергии ΔG . В этом случае уравнение химических реакций выглядит как:



где A, B, C – элементы состава композиции электрических контактов;

$\Delta\Phi$ – внутренняя энергия системы;

– непрерывное образование новых активных точек на рабочей поверхности твердой фазы за счет процесса диффузии и внутренней энергии.

Процессы, протекающие по данным схемам, называются тройными [7, 8], при которых, как раз, и образуется связанное состояние двух основных частиц, а третья частица уносит при этом выделяющуюся энергию.

Тогда в результате тройного процесса уравнение баланса для частиц имеет вид:

$$\frac{d[AB]}{dt} = K[A][B][C], \quad (2)$$

где A, B, C – плотность частиц соответствующего сорта;

t – время протекания процесса;

K – константа тройного процесса, которая не зависит от плотностей частиц.

Тройной процесс сопровождается увеличением кинетической энергии, т. к. в нее превращается потенциальная энергия, которая осуществляет притяжение всех частиц элементов, входящих в составы композиций электрических контактов. Причем, выделяющаяся энергия, изменяется за счет взаимодействия частиц, т.е. либо отдается, либо принимается. Тогда все частицы будут находиться в связанном состоянии. Все образования происходят от многократных парных соударений, которые и составляют основное состояние системы.

Многочисленные исследования [1–10] композиций электрических контактов с особыми термоэмиссионными свойствами показали, что их составы не претерпевают существенных изменений в процессе изготовления и эксплуатации. При этом, введение активирующих добавок приводит к видоизменению характера эрозии рабочей поверхности электрических контактов.

Выводы

На основе приведенной упрощенной физической модели показано развитие дугового разряда, получены факторы, определяющие повышенную дугостойкость составов композиций электрических контактов на основе $Ag+Ni$ +активная составляющая. Исходя их основных теоретических и экспериментальных исследований электрических контактов с особыми термоэмиссионными свойствами, определен механизм перемещения опорных точек дуги по их рабочей поверхности и получены экспериментальные составы композиций электрических контактов для коммутационных электрических аппаратов.

Список литературы

1. Павленко Т. П. Термоэмиссионная активность композиционных контактных материалов // Вестник НТУ "ХПИ". "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов". – Харьков. : НТУ"ХПИ". – 2005. – № 48. – С. 115–118.

2. Павленко Т. П. Физические процессы на поверхности контактов с учетом потоков плазмы и термоэмиссионной активности материала // *Електротехніка і Електромеханіка*. – Харьков. – 2009. – № 1. – С. 25–28.
3. Павленко Т. П. Контактные композиции повышенной дуговой стойкости для сильноточных электрических аппаратов. // *Вестник ХПИ "Новые решения в современных технологиях"*. – Харьков : ХПИ. – 2000 – № 84. – С. 154–157.
4. Милых В. И., Павленко Т. П. Анализ параметров плазмы, определяющих износ контактов коммутационных электрических аппаратов. // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – Кременчук. : КНУ. – 2011. – Вип.1/2011(13). – С. 68–71.
5. Павленко Т. П. Анализ прикатодных процессов с точки зрения физики твердого тела и явления термоэмиссии. // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2008. – № 25. – С. 104–108.
6. Милых В. И., Павленко Т. П. Фазовые превращения и свойства состояния системы контактной композиции // *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання*. – Кременчук : КНУ. – 2011.– Вип. 1/2011(1). – С. 244–245.
7. Кириченко В. І. Загальна хімія. Навч. посібн. – К. : Вища школа, 2005. – 637 с.
8. Корчинський Г. А. Хімія. – Вінниця : Поділля, 2002. – 528 с.
9. Милых В. И., Павленко Т. П. Возможность применения новых материалов в электротехнических устройствах. // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Проблемы автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Харків. – 2009. – С. 467–469.
10. Милых В. И., Павленко Т. П. Электрические контакты с особыми свойствами для коммутационных электрических аппаратов. // *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*. – Кременчук. : КДУ. – 2011. – Вип.3/2011(68). – С. 11–13.

DEVELOPMENT OF PROCESSES IN THE CATHODE REGION OF ELECTRICAL CONTACTS

T.P. PAVLENKO, D-r Sci. Tech, Professor

This work considers simplified physical models for research of processes and phenomena that occur on the working surface of electrical contacts and in the cathode region.

Поступила в редакцию 18.03 2013 г.