

## ОСОБЛИВОСТІ ДУГОВИХ РОЗРЯДІВ ТА ЕРОЗІЙНИХ ЯВИЩ

*А. М. Мрачковський, кандидат технічних наук*

*О. В. Соловей, студентка магістратури*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*E-mail: [Snovyda12@gmail.com](mailto:Snovyda12@gmail.com)*

**Анотація.** Низьковольтні електричні апарати грають важливу роль для забезпечення управління енергетичними процесами, захисту і комутації електричних кіл. Проблеми, які виникають в низьковольтних електричних апаратах на номінальні струми 32 - 1000 А, відносяться до електричних контактів, які визначають роботу електротехнічних пристроїв.

Основний внесок в розвиток ерозії робочої поверхні вносить електрична дуга, яка утворюється в міжконтактному проміжку при розмиканні електричних контактів.

У світовій практиці існуючі рішення підвищення дугостійкості електричних контактів не вирішують повністю проблему зменшення ерозії їх робочої поверхні. Застосування додаткових пристроїв в системах дугогасіння призводить до збільшення габаритів електричних апаратів. Використання в складах композицій дорогих і токсичних елементів призводить до підвищення собівартості електричних апаратів та отруєння навколишнього середовища. Зміцнення композиції контактів за рахунок застосування тугоплавких елементів призводить до підвищення перехідного опору.

Метою дослідження було обґрунтування і розвиток основних положень теорії процесів і явищ, які відбуваються на робочій поверхні і в приелектродних областях електричних контактів, та створення складів композицій контактів підвищеної дугостійкості для комутаційних електричних апаратів.

Обґрунтовано теорію механізму переміщення опорних точок дуги по робочій поверхні електричних контактів і отримані фактори, що забезпечують підвищену дугостійкість за рахунок термемісійних властивостей складів композицій контактів, які керують процесами дифузії, міграції та фазовими перетвореннями при хімічних реакціях.

Експериментально встановлено і теоретично підтверджено, що електрична ерозія в основному визначається мікроструктурою матеріалу та зміною фізико-механічних властивостей інгредієнтів на робочій поверхні контакт-деталей при комутації струму.

**Ключові слова:** *анод, катод, ерозія, знос контактів, робоча поверхня, стовп дуги, дугостійкість, перехідний опір*

**Актуальність.** У системах електропостачання та електроживлення різноманітних установок низьковольтні електричні апарати грають важливу роль для забезпечення управління енергетичними процесами, захисту і комутації електричних кіл. Проблеми, які виникають в низьковольтних електричних апаратах на номінальні струми 32 - 1000 А, таких як автоматичні вимикачі, електромагнітні контактори тощо, відносяться до електричних контактів, які визначають роботу електротехнічних пристроїв.

При роботі електричних апаратів контакти схильні до різних видів зносу, які викликають ерозію їх робочої поверхні. Основний внесок в розвиток ерозії робочої поверхні вносить електрична дуга, яка утворюється в міжконтактному проміжку при розмиканні електричних контактів. Тривале знаходження електричної дуги на робочій поверхні контактів, а також недостатня ефективність систем дугогасіння можуть призводити до зварювання контактних пар через плавлення складу композиції на робочій поверхні контактів, що в свою чергу створює умови для аварійної ситуації.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У світовій практиці існуючі рішення підвищення дугостійкості електричних контактів не вирішують повністю проблему зменшення ерозії їх робочої поверхні. Застосування додаткових пристроїв в системах дугогасіння призводить до збільшення габаритів електричних апаратів. Використання в складах композицій дорогих і токсичних елементів, наприклад, таких як, срібло, паладій, ртуть, окис кадмію, олово тощо, призводить до підвищення собівартості електричних апаратів та отруєння навколишнього середовища.

Зміцнення композиції контактів за рахунок застосування тугоплавких елементів, таких як вольфрам, молібден, нікель і інші призводить до підвищення перехідного опору.

Таким чином, вказані проблеми підкреслюють актуальність теми роботи, при цьому, очевидно, що немає оптимального рішення підвищення дугостійкості електричних контактів, яка визначається комплексними показниками для даного класу електричних апаратів. Тому цю проблему необхідно вирішувати із

застосуванням нових рішень і відповідних методів дослідження електричних контактів, які сприяють їх високій зносостійкості і дугостійкості без використання токсичних елементів.

**Мета дослідження** - обґрунтування і розвиток основних положень теорії процесів і явищ, які відбуваються на робочій поверхні і в приелектродних областях електричних контактів, та створення складів композицій контактів підвищеної дугостійкості для комутаційних електричних апаратів.

Для досягнення поставленої мети були поставлені і вирішені такі *завдання*:

1. Проаналізувати проблеми і процеси, що виникають при роботі електричних контактів, виходячи з особливостей роботи комутаційних електричних апаратів.

2. Обґрунтувати теоретичні та експериментальні дослідження про-процесів в приелектродних областях електричних контактів, виходячи з:

- основних положень теорії розвитку процесів, що визначають зношення електричних контактів; електронного та енергетичного стану прикатодної області;

- теорії взаємодії теплофізичних процесів у зоні контактування електричних контактів;

**Матеріали та методика дослідження.** Експериментальні дослідження контактів підвищеної ерозійної стійкості в автоматичних вимикачах ВА 50-41, ВА 75,77, а також контактів різних видів автоматичних вимикачів на струми 25-1000 А, серій контакторів КМ 20, КМ 25 проводилися в лабораторії електромеханічного заводу ВАТ "ЕТАЛ", м. Олександрія Кіровоградської області на атестованому обладнанні відповідно до державних стандартів і технічних умов.

При виготовленні контактів контролювалися такі параметри: питома маса композиції, твердість (мікротвердість елементів композиції електричних контактів) за Бринелем та структура компонентів композиції контактів як після виготовлення, так і після випробування.

Аналіз теплових процесів на контакт-деталях проводився методом розв'язування нелінійної задачі теплопровідності напівнескінченного тіла з урахуванням витрат енергії.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Існує дуже великий діапазон можливих змін параметрів дугових розрядів, різні умови їх виникнення і горіння, крім того, існує ряд специфічних особливостей, властивих тільки цьому виду розряду.

Від тліючого розряду дуговий розряд відрізняється відносно великим струмом (від 10 А і більше), великою густиною струму, малою напругою горіння і малим катодним падінням напруги (десятки вольт), відносно високою температурою (декілька тисяч градусів і більше).

Від іскрового розряду дуговий розряд відрізняється навпаки, значно меншою густиною струму в каналі розряду і нижчою температурою.

Але між цими видами розрядів існують перехідні форми, для яких ці відмінні особливості проявляються менш виразно. У той же час існують і особливі умови збудження та існування дугових розрядів, зовсім не властивих іншим видам розрядів, як наприклад, збудження дугового розряду шляхом розходження електродів під напругою, або шляхом руйнування вузьких перешийків.

Дуговий розряд відрізняється повздовжньою і поперечною будовою каналу розряду, приелектродними процесами, вольт – амперною характеристикою, він може існувати в широкому діапазоні тиску середовища (від дуже високих до дуже низьких, включно з вакуумом). Для дугового розряду характерна наявність трьох областей: стовпа дуги, прикатодної і прианодної областей, які різко відрізняються процесами, які відбуваються всередині них.

*Прикатодна область* займає невеликий простір, її довжина зазвичай складає не більше  $10^{-6}$  м, де створюється катодний спад напруги, який дорівнює 10 – 20 В. Середня напруженість електричного поля на катоді досягає  $10^7$  В/м. Основними носіями струму в катодній області є електрони, отримувані з катоду. Біля катоду розташований позитивний об'ємний заряд, утворений позитивними іонами. Між позитивним об'ємним зарядом і катодом утворюється електричне поле, в якому рухаються електрони, які вийшли з катоду. Сили електричного поля діють на електрон і збільшують його швидкість. При зіткненні такого електрона з нейтральною частинкою може виникнути іонізація, при цьому в електроні має бути

певна енергія. Для газів потенціал енергії коливається від 24 В до 13 В, а пари металів мають значно менший потенціал іонізації, наприклад, для парів міді він дорівнює 7,7 В. Утворені електрони не створюють біля катода від'ємного заряду, оскільки їх швидкість значно більша ніж швидкість тяжких позитивних іонів, які розганяються в полі катодного спаду напруги і бомбардують катод. Завдяки цьому температура катода зростає і досягає точки випаровування матеріалу електроду.

*Область дугового стовпа.* Енергія, отримана зарядженими частинками в електричному полі дугового стовпа настільки мала, що практично іонізація поштовхом не відбувається, а основним джерелом іонів і електронів є термічна іонізація. При великій температурі швидкість частинки збільшується до величини, при якій удар в нейтральний атом призводить до його іонізації. Чим менша маса частинки, тим більша швидкість її руху. Зі збільшенням тиску газу зменшується ступінь іонізації, в зв'язку з чим в багатьох дугогасних пристроях створюється підвищений тиск газу, який сприяє гасінню дуги. Дуже сильний вплив на іонізацію створює температура – тому у всіх без виключення дугогасних пристроях намагаються відводити тепло від дуги або за рахунок охолодження повітрям або газом (повітряні і масляні вимикачі), або за рахунок віддачі тепла стінкам дугогасної камери.

*Прианодна область.* Потік електронів із стовпа дуги направлений до позитивного електроду – аноду. Анод при дуговому розряді не випромінює позитивних іонів, які б могли нейтралізувати електрони. Тому поблизу аноду створюється негативний об'ємний заряд, що і викликає появу біляанодного спаду напруги і підвищення напруженості електричного поля. Величина анодної напруги залежить від температури аноду, самого металу, струму і складає від 5 до 10 В.

Електрони розганяються в полі, утвореному негативним об'ємним зарядом і анодом, а енергія, набута електронами, віддається аноду. Завдяки великій енергії електронів анод нагрівається до дуже високої температури, як правило, вищої температури катода.

Експериментально встановлено, що висока температура аноду і прикатодна область не створюють суттєвого впливу на виникнення і умови існування дугового

розряду, а завдання аноду зводиться до прийому електронного потоку із стовпа дуги. У області стовпа дуги позитивні і негативні об'ємні заряди врівноважують один одного, і результуючий заряд дорівнює нулю, а градієнт напруги в дузі залишається постійним (для дуги, яка вільно горить у повітрі, цей градієнт складає  $2 - 3 \cdot 10^3$  В/м, а в дугогасних пристроях градієнт сильно зростає, досягаючи  $2 - 3 \cdot 10^4$  В/м).

Позитивний стовп дуги – це область самостійного струму в газі, замкнена між приелектродними частинами і майже не пов'язана безпосередньо з процесами на електродах. Відомо, що процеси в ньому суттєво залежать від того, чи наявний в стовпі дуги термодинамічний стан рівноваги [7].

При відносно низькому тиску ( $p \leq 10^4$  Па) і при малому струмі ( $I \leq 1$  А) плазма стовпа дуги неізотермічна. Але при збільшенні струму і тиску температура електронів та іонів швидко вирівнюється, при цьому процес залежить і від роду газу (металева пара), в якому відбувається розряд. При тиску  $10^5$  Па в аргоні стан рівноваги настає при  $I > 10$  А, а в неоні або водні тільки при  $I > 200$  А. Наявність парів металу у відносно малій кількості (біля 1 %) сприяє встановленню стану рівноваги.

У загальному випадку необхідно враховувати існування відмінностей у фізичних процесах, які протікають в окремих частинах стовпа розряду – в центральній частині і на периферії. Таким чином, введення невеликих добавок газу або пари з малим потенціалом іонізації буде суттєво знижувати температуру.

Збільшення зовнішнього тиску також приводить до росту температури у всіх областях дуги. Температура і її розподіл пов'язані з енергетичним балансом довжини стовпа дуги, де електрична потужність, яку виділяє струм в елементі об'єму дорівнює сумі втрат тепла теплопровідністю, конвекцією і випромінюванням. Вольт – амперна характеристика розряду залежить від умов охолодження стовпа дуги: при більшій тепловіддачі від стовпа дуги відбувається зростання напруженості поля, за рахунок чого при заданому струмі зберігається стан рівноваги.

Великий вплив на параметри дугового розряду і його характеристики надають приелектродні процеси, особливо процеси на катоді. Характер та інтенсивність цих процесів суттєво змінюються залежно від електричних параметрів (сили струму, напруги, фізичних властивостей матеріалів електродів, стану їх поверхні, тиску і складу середовища, в якому горить дуга, відстані між електродами тощо).

Встановлено, що зона контакту плазми дугового розряду з поверхнею електроду має складну структуру, яка змінюється в часі не тільки в процесі розвитку розряду, але і в умовах стаціонарного режиму горіння дуги. Площа контакту плазми розряду з поверхнею електродів містить багато плям, число, розміри, форми, місце розташування яких не залишаються постійними навіть при фіксованих умовах і режимах горіння дуги. За цими плямами фактично і проходить струм розряду, створюючи таким чином неоднорідність у розподілі густини струму на площі контакту стовпа дуги.

Між цими поверхневими плямами і прив'язаними до них струмовими лініями існує електрична і магнітна взаємодія, яка впливає на їх формування і рух по поверхні електродів. Зважаючи на те, що густина струму в плямах може досягати до  $10^7 - 10^8$  А/см<sup>2</sup>, то необхідно враховувати дію джоулевого тепла в зонах розтікання струму, який протікає через ці плями.

З іншої сторони, оскільки вони хаотично виникають, зникають і переміщуються в межах основи дуги, то накладання їх температурних полів створює спільну зону нагрівання. Таким чином, спільний ерозійний слід утворюється як результат дії потоку енергії з каналу розряду (на катоді як суми енергій, які передаються іонами і випромінюванням, а на аноді – електронами і випромінюванням) і локального нагрівання плям. Тому, якщо основа дуги нерухома, то можна бачити спільний ерозійний слід – лунку, всередині якої можуть бути окремі локальні зони ерозії.

Для запобігання ерозійного руйнування електродів необхідно забезпечити достатньо високу швидкість переміщення дуги поверхнею електродів. Рух дуги може мати переривчастий і неперервний характер залежно від швидкості. При відносно малих швидкостях (порядку  $10^2 - 10^3$  м/с) характерне переривчасте

(стрибокподібне) пересування основи дуги на електродах, тоді як при високих швидкостях руху стає безперервним.

### **Висновки і перспективи.**

1. Експериментально встановлено, що висока температура аноду і прикатодна область не створюють суттєвого впливу на виникнення і умови існування дугового розряду.

2. Встановлено, що зона контакту плазми дугового розряду з поверхнею електроду має складну структуру, яка змінюється в часі не тільки в процесі розвитку розряду, але і в умовах стаціонарного режиму горіння дуги.

3. Експериментально встановлено і теоретично підтверджено, що електрична ерозія в основному визначається мікроструктурою матеріалу та зміною фізико-механічних властивостей інгредієнтів на робочій поверхні контакт-деталей при комутації струму.

### **Список використаних джерел**

1. Белкин Г. С., Киселев В. А. Разрушение контактов под действием концентрированных потоков тепла. Сб. тр. Сильноточные электрические контакты. К.: Наукова думка, 1972. С. 142-146.

2. Буткевич Г. В. и др. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.

3. Долинский Ю. М., Королев Н. В., Фомин В. И., Гридин Н. Ю. Исследование износа и контактного сопротивления в процессе коммутации тока металлокерамическими контактами. Электротехника. 1988. № 2. С. 82–88.

4. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.

5. Зиновкин В. В., Волкова О. Г. Методика анализа и контроля сопротивления контактов переключающих устройств в процессе многократных коммутаций. Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика». Дніпродзержинськ : ДДТУ. 2007. С. 483-484.

6. Карпинос Д. М., Максимович Г. Г., Кадыров В. Х. Прочность композиционных материалов. К.: Наукова думка, 1978. 236 с.

7. Намитоков К. К., Меленный А. М., Павленко Ю. П. О некоторых путях повышения эрозионной стойкости электродов. Харьков, 1984. 10 с.

8. Намитоков К. К. Электроэрозионные явления. М.: Энергия, 1978. 456 с.



9. Павленко Ю. П., Меленный А. М. Динамика разрушения электрода под действием импульсного разряда. Сб. научн. тр. Исследование, разработка и технология производства аппаратов низкого напряжения. Чебоксары. 1984. С. 38–41.

### References

1. Belkin, G. S., Kiselev, V. A. (1972). Razrusheniye kontaktov pod deystviyem kontsentrirrovannykh potokov tepla [Destruction of contacts under the influence of concentrated heat flows]. Sb. tr. Sil'notochnyye elektricheskiye kontakty. Kyiv: Naukova dumka, 142-146.

2. Butkevich, G. V. (1978). Elektricheskaya eroziya sil'notochnykh kontaktov i elektrodov [Electrical erosion of high current contacts and electrodes]. Moskow: Energiya, 256.

3. Dolinskiy, YU. M., Korolev, N. V., Fomin, V. I., Gridin, N. YU. (1988). Issledovaniye iznosa i kontaktnogo soprotivleniya v protsesse kommutatsii toka metallokeramicheskimi kontaktami [Investigation of wear and contact resistance in the process of current commutation with cermet contacts]. Elektrotehnika, 2, 82–88.

4. Dul'nev, G. N., Zarichnyak, YU. P. (1974). Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. Leningrad: Energiya, 264.

5. Zinovkin, V. V., Volkova, O. G. (2007). Metodika analiza i kontrolya soprotivleniya kontaktov pereklyuchayushchikh ustroystv v protsesse mnogokratnykh kommutatsiy [Methods for analyzing and monitoring the resistance of contacts of switching devices in the process of multiple commutations]. Zbirnik naukovikh prats' Dniprodzerzhyn'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu (tekhnichni nauki). Tematichniy vipusk «Problemi avtomatizovanogo yelektroprivoda. Teoriya i praktikA». Dniprodzerzhyn'sk : DDTU, 483-484.

6. Karpinos, D. M., Maksimovich, G. G., Kadyrov, V. K. (1978). Prochnost' kompozitsionnykh materialov [Strength of composite materials]. Kyiv: Naukova dumka, 236.

7. Namitokov, K. K., Melennyu, A. M., Pavlenko, YU. P. (1984). O nekotorykh putyakh povysheniya erozionnoy stoykosti elektrodov [On some ways of increasing the erosion resistance of electrodes]. Khar'kov, 10.

8. Namitokov, K. K. (1978). Elektroerozionnyye yavleniya [Electrical Discharge Phenomena]. Moskow: Energiya, 456.

9. Pavlenko, YU. P., Melennyu, A. M. (1984). Dinamika razrusheniya elektroda pod deystviyem impul'snogo razryada [Dynamics of electrode destruction under the action of a pulsed discharge]. Sb. nauchn. tr. Issledovaniye, razrabotka i tekhnologiya proizvodstva apparatov nizkogo napryazheniya. Cheboksary, 38–41.

## ОСОБЕННОСТИ ДУГОВОГО РАЗРЯДА И ЭРОЗИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ

*А. Н. Мрачковский, О. В. Соловей*

**Аннотация.** Низковольтные электрические аппараты играют важную роль для обеспечения управления энергетическими процессами, защиты и коммутации

*электрических цепей. Проблемы, которые возникают в низковольтных электрических аппаратах на номинальные токи 32 - 1000 А, относятся к электрическим контактам, которые определяют работу электротехнических устройств.*

*Основной вклад в развитие эрозии рабочей поверхности вносит электрическая дуга, которая образуется в межконтактного промежутке при размыкании электрических контактов.*

*В мировой практике существующие решения повышение дугостойкости электрических контактов не решают полностью проблему уменьшения эрозии их рабочей поверхности. Применение дополнительных устройств в системах дугогашения приводит к увеличению габаритов электрических аппаратов. Использование в составах композиций дорогих и токсичных элементов приводит к повышению себестоимости электрических аппаратов и отравления окружающей среды. Укрепление композиции контактов за счет применения тугоплавких элементов приводит к повышению переходного сопротивления.*

*Целью исследования было обоснование и развитие основных положений теории процессов и явлений, происходящих на рабочей поверхности и в приэлектродных областях электрических контактов и создание складов композиций контактов повышенной дугостойкости для коммутационных электрических аппаратов.*

*Обоснована теория механизма перемещения опорных точек дуги по рабочей поверхности электрических контактов и получены факторы, обеспечивающие повышенную дугостойкость за счет термоэмиссионных свойств составов композиций контактов, управляющих процессами диффузии, миграции и фазовыми превращениями при химических реакциях.*

*Экспериментально установлено и теоретически подтверждено, что электрическая эрозия в основном определяется микроструктурой материала и изменением физико-механических свойств ингредиентов на рабочей поверхности контакт-деталей при коммутации тока.*

**Ключевые слова:** *анод, катод, эрозия, износ контактов, рабочая поверхность, столб дуги, дугостойкость, переходное сопротивление*

## **FEATURES OF ARC DISCHARGES AND EROSION PHENOMENA**

**A. Mrachkovskiy, O. Solovoi**

**Abstract.** *Low-voltage electrical appliances play an important role in ensuring the control of energy processes, protection and switching of electrical circuits. Problems that occur in low-voltage electrical devices at rated currents of 32 - 1000 A, relate to electrical contacts that determine the operation of electrical devices.*

*The main contribution to the development of erosion of the working surface is made by an electric arc, which is formed in the inter-contact gap when opening electrical contacts.*

*In world practice, existing solutions to increase the arc resistance of electrical contacts do not completely solve the problem of reducing erosion of their work surface. The use of additional devices in arc suppression systems leads to an increase in the size of electrical devices. The use of expensive and toxic elements in the compositions leads to an*

*increase in the cost of electrical appliances and poisoning of the environment. Strengthening the composition of the contacts through the use of refractory elements leads to an increase in the transient resistance.*

*The aim of the study was to substantiate and develop the main provisions of the theory of processes and phenomena that occur on the work surface and in the electrode areas of electrical contacts, and to create compositions of high arc contact compositions for switching electrical devices.*

*The theory of the mechanism of movement of arc reference points on the working surface of electrical contacts is substantiated and the factors providing increased arc resistance due to thermoemission properties of contact composition compositions that control diffusion, migration and phase transformations during chemical reactions are obtained.*

*It has been experimentally established and theoretically confirmed that electric erosion is mainly determined by the microstructure of the material and the change in the physical and mechanical properties of the ingredients on the working surface of the contact parts during current switching.*

**Key words:** *anode, cathode, erosion, contact wear, working surface, arc column, arc resistance, transient resistance*