

ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Крыгина Татьяна Павловна

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СЕРЕБРОСВЕРГАЮЩИХ
КОНТАКТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

05.09.06. - электрические аппараты

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Харьков - 1993

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00815712 (O)

Работа выполнена в акционерном обществе "Электрические низковольтные аппараты и системы (АО ЭНАС) и на кафедре "Электрические аппараты" Харьковского политехнического института.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Долинский Д.М.

Официальные оппоненты - Заслуженный деятель науки Украины,
доктор технических наук,
профессор Намитоков К.К.
кандидат технических наук,
доцент Коробов В.А.

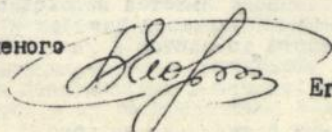
Ведущее предприятие - Научно-производственное объединение
"ХЭМЗ", г. Харьков.

Защита диссертации состоится 6 октября 1993 года, в 14 часов 30 минут на заседании специализированного ученого совета К 068.39.04 в Харьковском политехническом институте (310002, г. Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " 3 " сентября 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого
совета



Егоров В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Задача экономии материалов, особенно остродефицитных и драгоценных металлов, всегда являлась первостепенной в низковольтном аппаратостроении (НВА). В основном серебро расходуется на материал контактов. Замена серебра медью возможна далеко не во всех типах аппаратов из-за образования токонепроводящих пленок на рабочей поверхности и неизбежного ухудшения технических характеристик НВА, поэтому в мировой практике основные работы направлены на уменьшение дуговой эрозии контактов. Это достигается за счет упрочнения материала введением твердых и тугоплавких компонент, дугогасящих добавок, уменьшением дисперсности фаз. Однако введение твердых и тугоплавких компонент приводит к увеличению переходного сопротивления и увеличению контактного нажатия; дугогасящие добавки (с₁₀) высокотоксичны.

К серебросодержащим контактам ряда аппаратов не предъявляются требований высокой дугостойкости. Контакты токоограничивающих устройств (УТ) должны обеспечивать низкое переходное сопротивление и высокую устойчивость против сваривания при отключении (3-х кратном) тока короткого замыкания (КЗ); главные контакты многоамперных выключателей, имеющих специальные дугогасительные контакты - низкое переходное сопротивление и высокую электродинамическую устойчивость, определяющую предельную коммутационную способность (ПКС) выключателя.

Применение жидкометаллических контактов (ЖМК), в высшей степени, удовлетворяющих этим требованиям, усложняет конструкцию контактного узла (требуется герметизация); в материале контактов используются редкие металлы - индий, галлий.

В свете изложенного имеется необходимость поиска новых путей повышения дугостойкости контактов и уменьшения переходного сопротивления контактов многоамперных выключателей и токоограничивающих устройств при исключении содержания серебра.

Цель и задачи работы. Целью настоящей работы является разработка контактных материалов, обеспечивающих высокую дугостойкость серебросодержащих контактов без увеличения переходного сопротивления для коммутирующих низковольтных электрических аппаратов и бессеребряных материалов, обеспечивающих низкое переходное сопротивление и высокую электродинамическую устойчивость контактов для аппаратов с бездуговой коммутацией; оба типа контактов не должны содержать дорогих или высокотоксичных материалов.

Задачами работы являлись:

- определение возможности уменьшения эрозии контактов, за счет создания особой эмиссионной структуры рабочей поверхности, способствующей перемещению опорных пятен электрической дуги;
- определение возможности обеспечения низкого переходного сопротивления и высокой ЭДУ твердых контактов путем изменения агрегатного состояния части материала в точках контактирования при протекании тока и увеличения, за счет этого, площади контактирования;
- создание контактных материалов, обеспечивающих выполнение указанных требований.

Методы исследований. Выполненные работы базировались на теоретических и экспериментальных исследованиях.

В экспериментальных работах использовали стандартное и специальное технологическое, исследовательское оборудование, установки и приборы. Разработаны стенд для определения эксплуатационных характеристик материалов при протекании или коммутации рабочих токов, установка для исследования влияния эмиссионной структуры материала на скорость движения дуги, макетный образец контактного устройства, имитирующий работу многоамперного выключателя.

Эмиссионную структуру рабочей поверхности контактов исследовали с помощью электронного термоэмиссионного микроскопа ЕР-6 (Карл Цейс, Йена). Концентрацию элементов и их распределение выявляли микрорентгеноспектральными методами с помощью установок МАР-2 и растрового элек-

треного микроскопа-микроанализатора РЭММА. Фазовый состав материалов и рабочей поверхности контактов определяли с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-2 и таблиц ASTM, локальный химический состав кристаллов - на электронном микроскопе М-820 с анализатором АН-1000 (Линке-Аналитикал, Великобритания).

Основные положения, выносимые на защиту:

- разработка состава и технологии изготовления бессеребряного контактного материала, обеспечивающего низкое переходное сопротивление и высокую электродинамическую устойчивость контактов за счет реализации принципа изменения агрегатного состояния в точках контактирования (псевдожидкометаллический контакт - ПЖМК);

- разработка математической модели контактной проводимости ПЖМК;

- разработка технологии изготовления контактного узла (контакт-контактодержатель);

- разработка методики оценки и сравнения изменяющихся во времени переходных сопротивлений контактов методами математической статистики;

- разработка состава и технологии изготовления серебросодержащих контактов высокой дугостойкости, обеспечиваемой особыми эмиссионными свойствами материала.

Научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

I. Разработана и реализована в виде алгоритмов и программ ПЭВМ методика исследования эксплуатационных свойств контактных материалов методами математической статистики. Методика позволяет отдельно оценить и сравнить изменение переходного сопротивления из-за изменения фазового, структурного, химического состава материала во времени и разброса измерений из-за случайных и неслучайных факторов и может быть использована при решении вопросов сбора и обработки результатов испы-

таний, в частности, при автоматизации и компьютеризации испытаний электрических аппаратов.

2. Разработана и реализована в виде алгоритмов и программы ПЭВМ математическая модель контактной проводимости ПЖМЖ, связывающая переходное сопротивление контактов с физическими, количественными и размерными параметрами матрицы и арматуры.

3. Разработаны бессеребряные композиционные материалы для контактов электрических аппаратов, позволяющие реализовать принцип использования изменения агрегатного состояния материала в точках контактирования при пропускании токов. Контакты обеспечивают низкое - на уровне серебросодержащих контактов - переходное сопротивление при длительном пропускании токов или бездуговой, как в многоамперных выключателях, их коммутации; высоко - в 4-6 раз выше, чем серебросодержащие контакты - электродинамическую устойчивость; материал имеет низкую прочность сваривания и сохраняет работоспособность после пропускания или коммутации токов КЗ.

Применение таких контактов в токоограничивающих устройствах и многоамперных выключателях позволит сэкономить остродефицитное серебро без ухудшения характеристик аппаратов; высокая ЭДУ их открывает широкие возможности резкого уменьшения массогабаритных показателей внедряемых аппаратов.

4. На основании исследований ПЖМЖ с различными основами и наполнителями, а также эволюции фазового состава материала под термическим воздействием дуги, определены пути повышения дугостойкости контактов с целью использования их в выключателях с дуговой коммутацией тока.

5. На уровне изобретения разработаны принцип и составы серебросодержащих контактных материалов высокой дугостойкости, обеспечиваемой особыми эмиссионными свойствами рабочей поверхности. Эрозия контактов в 1,5-2,5 раза меньше, чем у серийных контактов близкого

состава; особый характер эрозии уменьшает склонность к свариванию и в большинстве случаев позволяет отказаться от применения высекотек-сичных и с большим (на 15 %) содержанием серебра композиций сере-бре- окись кадмия.

Реализация результатов работы . Практическим результатом ра-боты является решение завода "Контактор" (г. Ульяновск) о целесообраз-ности использования разработанных дугестойких контактов композиции СН 30 в автоматических выключателях серии ВА 50-4I (I_н= 1000 А) вме-сте серийных КМК-А30м и КМК-А10м. Заводом проводятся испытания ПЖМК в рамках подготовки к производству многоамперного выключателя типа ВА 75. Проводятся испытания ПЖМК в аппаратах АРИ-50 (I_н=1600 А), ДС -420 (I_н= 4000 А) фирмы "Алена" (Польша) и серебродержащих кон-тактов повышенной дугестойкости - в контакторах ЖЛ-3.

Апробация работы. Основные положения диссертации обсуждались на IV Всесоюзной научно-технической конференции (1990 г.), на рас-ширенных научно-технических советах ВНИИЭлектроаппарат (1990-1991гг.) совещании специалистов Ульяновского завода "Контактор", где рассмат-ривался вопрос о возможном внедрении дугестойких контактов в аппаратах серии ВА 50-4I (I_н= 1000 А) (1991-1992 гг.); на расширенном совеща-нии специалистов акционерного общества "Электрические низковольтные аппараты и системы" (АО ЭНАС) и специалистов фирмы "Алена" (Польша), где рассматривался вопрос о применении бессеребряных контактов (в ка-честве главных) в аппаратах АРИ-50 (I_н=1600 А), ДС -420 (I_н=4000 А) и дугестойких контактов- в контакторах ЖЛ-3 (I_н=160 А) (1992 г.). На совещании специалистов Ангарского электромеханического завода и АО ЭНАС рассматривался вопрос о внедрении бессеребряных контактов в аппаратах ВА 52-35 (I_н=250 А) (1992 г.). В полном объеме диссертаци-онная работа доложена на расширенных заседаниях АО ЭНАС (1993 г.) и на кафедре "Электрические аппараты" Харьковского политехнического ин-ститута (1993 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 4 публикации, получено 2 решения о выдаче патентов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа общим объемом 174 страницы, состоит из 5 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Работа содержит 101 страницу машинописного текста, 51 рисунок, 26 таблиц; библиографический список - 161 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе (введении) обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и новизна полученных результатов.

Во второй главе на основании анализа литературных и патентных источников показано, что наиболее перспективным путем повышения долговечности контактов является создание активированного материала, обеспечивающего создание такой эмиссионной структуры рабочей поверхности контакта, которая способствовала бы перемещению опорных пятен дуги и препятствовала бы переходу от катодных пятен I типа к II-му, вызывающему сильную эрозию материала. Сформулированы основные требования к материалу и его компонентам:

- активатор должен активировать хотя бы один из металлов композиции, желательно - наиболее тугоплавкий;
- активирование материала должно привести к эмиссионному контакту, изменяющемуся с локальным изменением температуры;
- температура дезактивации должна быть ниже температуры плавления активируемого материала;
- материал не должен содержать дорогих, остродефицитных и высокотоксичных материалов.

Наиболее перспективным путем создания бессеребряных контактов является реализация принципа изменения агрегатного состояния в точках контактирования при пропускании тока, что должно обеспечить низкое переходное сопротивление и высокую ЭДУ за счет самопроизвольного увели-

чения площади контактирования.

Материал должен обеспечивать:

- низкое на уровне серебросодержащих материалов - переходное сопротивление контактов и их более высокую электродинамическую устойчивость;

- достаточную дугостойкость при многократных отключениях токов короткого замыкания;

- постоянство во времени переходного сопротивления контактов;

- малое усилие разрыва сварившихся контактов;

- не содержать остродефицитных и дорогих (серебро, индий, галлий) и высокотоксичных (ртуть) металлов.

Требования могут быть обеспечены, если легкоплавкая составляющая будет электропроводной, температура ее плавления будет ниже предельно-допустимой для токоведущих частей аппарата и заметно не изменять своих свойств при этой температуре в течение установленного времени.

В третьей главе изложены общая и частные методики выполнения комплексной работы по разработке и исследованию контактных материалов, разработке технологии изготовления и испытаний контактов. Описаны разработанные установка для исследования влияния эмиссионной структуры рабочей поверхности контактов на скорость движения дуги, стенды для испытаний контактов в режиме коммутации токов от 10 до 10000 А при напряжении до 1 В и токов 1-50 А при напряжении 220 В, макет контактного устройства, имитирующего работу многоамперного выключателя. Приведены методики исследования дуговой эрозии и времени горения дуги при коммутации номинальных и больших (до 15,6 кА) токов, электродинамической устойчивости и прочности сваривания.

Разработана методика исследования изменяющихся во времени эксплуатационных свойств (в частности, переходного сопротивления при коммутации тока) контактов методами математической статистики.

Переходное сопротивление контактов из определенного материала

можно рассматривать как действительную функцию; измеренная величина его в каждый момент времени (после некоторого количества циклов включения-отключения) определяется также действием случайных факторов (например, площадью контактирования). Поэтому серию результатов измерений переходного сопротивления можно рассматривать как реализацию $f(t)$ случайного процесса $\xi(t)$, трактуемого как семейство случайных величин и неслучайных функций.

Из приведенного в главе анализа литературы, следует возможность применения эргодической гипотезы если из нестационарного процесса можно выделить случайную функцию с нулевым средним:

$$E[x(t)] = E[a(t) + u(t)] = E[a(t)] + E[u(t)] = a(t) + 0 = a(t)$$

где $a(t)$ - детерминированная функция;
 $u(t)$ - случайный процесс с нулевым средним.

В нашем случае реализацию можно записать:

$$x(t) = \bar{x}(t) + w(t) \quad (1)$$

где $x(t)$ - реализация случайного процесса (экспериментальные данные);

$\bar{x}(t)$ - математическое ожидание процесса (функция переходного сопротивления);

$w(t)$ - центрированный стационарный по математическому ожиданию процесс (функция отклонений переходного сопротивления от среднего значения).

Выделение математического ожидания (тренда) производится фильтрацией процесса (скользящим усреднением ординат реализации на некотором интервале:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{L} \int_{t-\frac{L}{2}}^{t+\frac{L}{2}} x(t) dt \quad (2)$$

Поскольку наблюдения производятся не через равные промежутки времени, применяется метод взвешенного скользящего среднего. Сглаженное значение наблюдений $\bar{X}(t_k)$ в точке \bar{t}_k .

$$\bar{X}(t_k) = \frac{\bar{X}(t_i)t_i + \bar{X}(t_{i+1})t_{i+1} + \dots + \bar{X}(t_{i+p-1})t_{i+p-1}}{t_i + t_{i+1} + \dots + t_{i+p-1}} \quad (3)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$; $K = 1, 2, \dots, N-p+1$; $t_i = 0$; интервал сглаживания $p \in \{2, 3, \dots, N\}$ - общее количество зафиксированных точек случайного процесса.

Координата точки, для которой найдено значение $\bar{X}(t_k)$:

$$t_k = \frac{t_i + t_{i+1} + \dots + t_{i+p-1}}{p} \quad (4)$$

Дисперсия стационарных остатков вычисляется по формуле:

$$\sigma^2[\bar{X}(t)] = \frac{\sum_{i=1}^p W^2(t_i)}{p-1} \quad (5)$$

Вектор W рассматривается как стационарный остаток 0-го порядка, из которого на следующих итерациях выделяются свой тренд и стационарный остаток.

Взвешенная скользящая средняя равна алгебраической сумме функций, полученных на всех итерациях. Сравнение двух трендов производится по расстоянию между ними:

$$\Delta \bar{X}_k = \bar{X}_1(t_k) - \bar{X}_2(t_k) \quad (6)$$

$K = 1, 2, \dots, N-p+1$.

Полученное множество есть вектор расстояний между ними. Среднее расстояние равно:

$$\Delta \bar{X}_{cp} = \sum_{K=1}^{N-p+1} \Delta \bar{X}_K / N-p+1 \quad (7)$$

Для уровня вероятности 90% условие различимости процессов:

$$\Delta \bar{X}_{cp} \geq 1,64(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (8)$$

где σ_1 и σ_2 - стандартные отклонения первого и второго процессов, соответственно, на выбранном интервале наблюдений.

В качестве второго метода сравнения выбран метод сравнения гипотез о выборках со взаимно сопоставленными членами. Вектор разностей ординат двух процессов $R(i)$, $i = 1, 2, \dots$ и интерпретируется как случайный процесс. Проверка выполняется с применением t - критерия Стьюдента.

Разработаны алгоритм и программа расчета на ЭЭВМ.

Четвертая глава посвящена разработке и испытаниям псевдожидко-металлических контактов. Испытания разработанного макетного материала с каркасом из медной проволоки с легкоплавким наполнителем ($T_{пл} = 93^{\circ}\text{C}$) показали, что заложенный принцип - увеличение площади контактирования при увеличении протекающего тока реализуется; за счет этого переходное сопротивление равно и ниже переходного сопротивления серебрясодержащих контактов (рис. 1). Электродинамическая устойчивость их также значительно превосходит ЭДУ серебрясодержащих, однако прочность сваривания в 2-3 раза больше. Результаты испытаний показали необходимость упрочнения каркаса за счет применения методов порошковой металлургии.

Для определения оптимальных характеристик контактов разработана математическая модель контактной проводимости ПЖМК (в жидкой фазе), связывающая переходное сопротивление с соотношением объемов туго- и легкоплавкой составляющих с размером зерен наполнителя ("пор" основы), с электропроводностью материалов, с взаимной смачиваемостью, с твердостью композиционного материала и усилием нажатия. Модель базируется на разработках Д.М. Долинского и С.А. Некрасова.

В основу модели положены электрическое сопротивление жидкого мостика и вероятностное определение количества мостиков.

Форма мостика определяется состоянием с минимальной энергией W . Полная энергия системы W равна потенциальной энергии поверхностного натяжения и энергии взаимодействия жидкого наполнителя с поверхностью материала матрицы

$$W = G S + \mu S_0 \quad (9)$$

где G - поверхностное натяжение наполнителя;
 μ - предельная энергия взаимодействия материала наполнителя и матрицы;
 S, S_0 - соответственно боковая и торцевая поверхности мостика (рис. 2)

Математическое решение задачи по определению характеристик мостика и переходного сопротивления, приведенное в диссертации, дало следующие соотношения:

$$\text{средний радиус пятен } R_1 = \alpha \cdot R_0 \quad (10)$$

где R_0 - размер "пор" (зерен наполнителя)

$$\alpha = \max(1, \alpha_0)$$

а α_0 является решением нелинейного уравнения:

$$\alpha_0^3 = [1 + K_{so}(\alpha_0^2 - 1)] \frac{\alpha l_*}{R_0 \varphi(\theta)} \quad (11)$$

где K_{so} - коэффициент поверхностной "пористости" примерно равной коэффициенту объемной пористости ;

l_* - средняя глубина проплавления в контактной зоне;

θ - краевой угол смачивания наполнителем материала матрицы;

α - коэффициент объемного расширения материала наполнителя;

φ - функция угла смачивания.

Геометрические параметры мостика определяются в виде:

$$h = R_1 \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \quad (12)$$

$$R_{\min} = h [\operatorname{ctg}(\theta) - \sec \theta] \quad (13)$$

$$f = h [\operatorname{ctg}(\theta) - \operatorname{tg} \theta] \quad (14)$$

где $b(\theta)$ - сложная функция угла смачивания

Количество "пор," ассоциирующих в одно контактное пятно, может быть оценено по формуле:

$$K_{fj} = \max(1, K_{fj0}) \quad (15)$$

$$K_{fj0} = 1 - K_{fj0} [z^2 (6 \cdot \lg B)^2 (\lg \frac{d}{z} - 1)] \quad (16)$$

Количество контактных пятен на воспринимающей усилителе поверхности Ω в среднем:

$$N = K_S \frac{\Omega}{\pi R_1^2} \quad (17)$$

где $K_S = K_{S0} \cdot z^2$

Наиболее реально считать, что поры (зерна наполнителя) случайно расположены в пределах области Ω с равномерной плотностью вероятности; это же относится к группе пор, которые могут ассоциироваться в пятно при образовании мостика (гипотетическое пятно). Тогда вероятность вступления в контакт одного пятна на одном контакте с одним из пятен на другом равна:

$$P_j^* = \min [1, 4 K_S (1 - \sum_{i=1}^{j-1} P_i) / N] \quad (18)$$

Общее количество пятен, вступивших в контакт, и, соответственно, количество проводящих мостиков равно:

$$n = \sum_{j=1}^N P_j^* \quad (19)$$

Полное электрическое сопротивление, приходящееся на один мостик складывается из сопротивления жидкометаллического перешейка R_{AM} и сопротивления стягивания R_{emM} .

$$R_M = R_{AM} + R_{emM} \quad (20)$$

Сопротивление перешейка выражается соотношением:

$$R_{AM} = \int_0^{2h} \frac{dx}{\rho \cdot \pi r^2(x)} \quad (21)$$

где ρ - удельная электропроводность расплава;
 $r(x)$ - радиус сечения мостика.

Сопротивление стягивания можно представить в виде:

$$R_{сгм} = \frac{r_0 R_{к0}}{k_f} + \frac{1}{2j_+ \cdot f} \quad (22)$$

где $R_{к0}$ - сопротивление стягивания, приходящееся на одну пору;

j_+ - удельная электропроводность твердой фазы ПЖМК.

Введя обозначение $\varepsilon = j_- / j_+$ ($j_- \leq j_+$; $0 < \varepsilon < 1$),

можно представить $R_{к0}(\varepsilon) \approx R_{к0}(0)(1-\varepsilon) + R_{к0}(1)\varepsilon$

$$R_{к0}(1) = \frac{1}{4j_- \cdot R_0} \quad (23)$$

Величина $R_{к0}(0)$ находится посредством решения краевой задачи Дирихле из уравнения Лапласа и равна:

$$R_{к0}(0) = \frac{4}{\pi R_0 \cdot j_-} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{x_j^3}$$

где x_j - положительные корни уравнения $J_0(x_j) = 0$
 $J_0(x_j)$ -функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Таким образом,

$$R_{к0}(\varepsilon) = \frac{1}{R_0 \cdot j_-} \left[x(1-\varepsilon) + \frac{\varepsilon}{4} \right] \quad (24)$$

где

$$x = \frac{4}{\pi} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{x_j^3} \approx 0.1$$

(согласно численному суммированию на ЭВМ).

В работе приведены также формулы для расчета радиуса области в плоскости контакта, в пределах которой наполнитель находится в жидком состоянии а также глубины проплавления.

Разработаны алгоритмы и программа расчета на ЭВМ.

В качестве примера расчета на рис. 3 приведены поверхности

$R_{сгп} = f(k_s, R_0)$ для двух соотношений электропроводностей твердой и жидкой фаз.

Результаты расчета подтвердили результаты, полученные на макетных образцах в части оптимальных соотношений основы-наполнитель. Разработана технология изготовления контактов, заключающаяся в получении методами порошковой металлургии медного каркаса требуемой пористости и последующей пропитки под слоем флюса легкоплавким наполнителем.

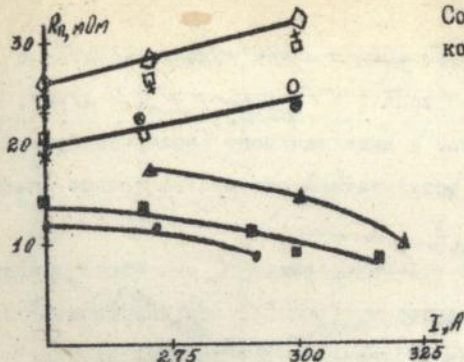


Рис. 1. Зависимость падения напряжения от величины тока.

Соотношение тугоплавкой и легкоплавкой составляющих:

● 1:6 ■ 1:3 ▲ 1:1

+	КМК-А32	○	КМК-А41
	КМК-А30м		КМК-А30м
□	КМК-А10м	×	Си-1, 4%С
	КМК-А30м		СиМ1
⊙	КМК-А41	◇	КМК-А32
	СиМ1		СиМ1

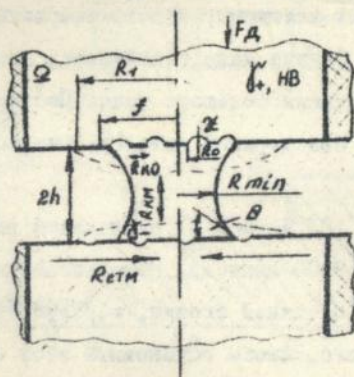


Рис. 2. Жидкометаллический мостик.

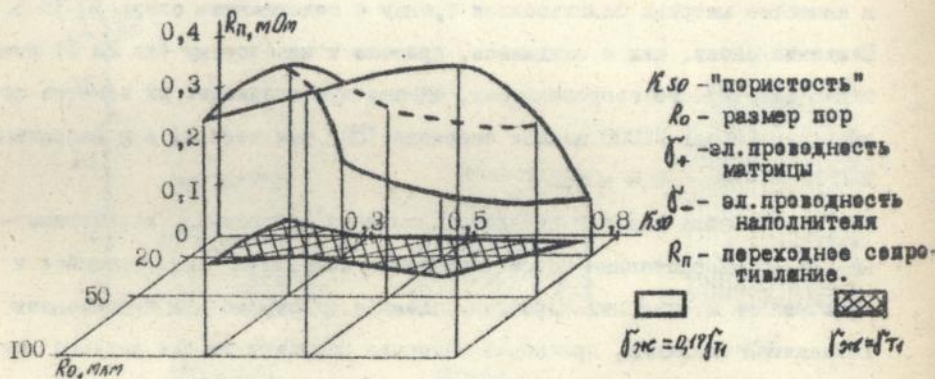


Рис. 3. Расчетное переходное сопротивление ПМК при различных значениях "пористости" и размерах "пор".

Результаты испытаний контактов на стендах свидетельствуют о том, что при условных плотностях тока ($I/S_{\text{конт}} \geq 1,2 \text{ A/mm}^2$), переходное сопротивление их равно и ниже такового серебросодержащих (рис. 4) и хорошо согласуется с результатами расчета не только качественно, но и количественно.

ПЖМК обеспечивают в 4 - 6 раз более высокую, чем серебросодержащие, электродинамическую устойчивость (рис. 5), что обеспечивается мгновенным 1 - 2 мс - увеличением площади контактирования за счет расплавления, что видно из рис. 6

Характерно, что контакты имеют низкую прочность сваривания, если не происходит отброса (табл. I) Однако даже сварившиеся контакты отбрасываются при последующем пропускании большого тока. После разрыва рабочая поверхность контактов - без вырывов металла, микроструктура материала - без изменений.

При дуговой коммутации тока (21 А, 220 В) наблюдался рост $R_{\text{пер}}$ (от 0,21 до 1,29 мОм после 9400 циклов). Металлографически установлено образование новой фазы - оловяной бронзы, образующейся за счет диффузии олова в медь. Для того, чтобы остановить этот процесс в качестве матрицы использовали бронзу с содержанием олова 10-15%. Введение олова, как и ожидалось, привело к некоторому (до 20%) повышению переходного сопротивления, однако дугостойкость их заметно повысилась (после 20000 циклов операций "В0" при токе 21 А и напряжении 220 В $R_{\text{пер}} \leq 0,6 \text{ мОм}$).

Сложной задачей являлось крепление контактов. Разработаны - на уровне изобретения - способ крепления контактов, заключающийся в прессовании и спекании порошков основы с одновременным припеканием контактной накладки, причем, в материал накладки вводят летучий галогенсодержащий компонент; после спекания пористую матрицу пропитывают наполнителем. Для крупных контактов многоамперных выключателей разработана технология, заключающаяся в пайке контакта (с подслоем)

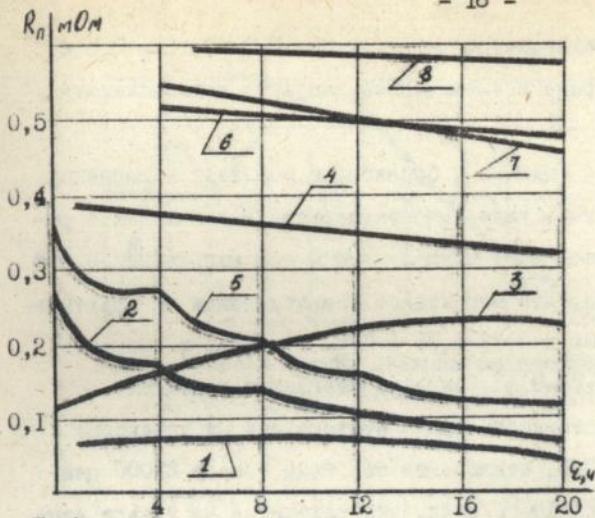


Рис. 4. Переходное сопротивление в зависимости от величины тока.

1. КМК-А00
2. $R_0 = 20+40$, $K_{SO} = 0,65$
3. КМК-А33мм/КМК-А30м
4. $R_0 = 40+$, $K_{SO} = 0,3$
5. $R_0 = 40$, $K_{SO} = 0,65$
6. $R_0 = 80$, $K_{SO} = 0,3$
7. $R_0 = 80$, $K_{SO} = 0,8$
8. $R_0 = 20+60$, $K_{SO} = 0,65$
(Ni) $f_{Ta} = 0,2 f_T$; $f_{Zc} = 8 T$

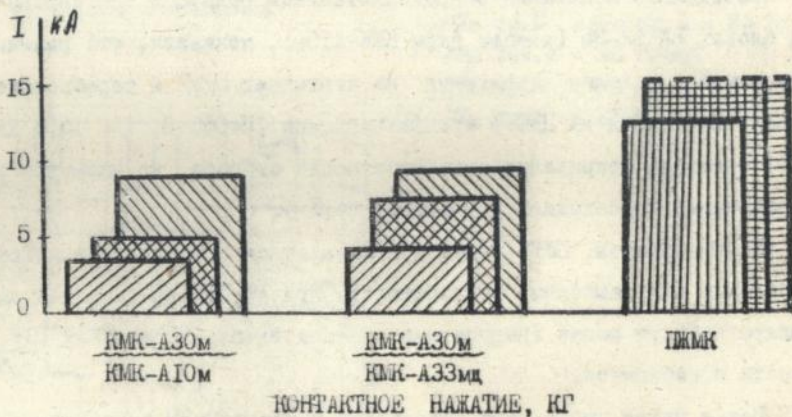
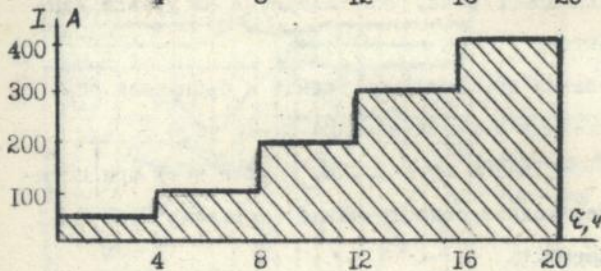


Рис. 5. ЭДУ бессеребряных и серебросодержащих контактов.

к контактодержателю низкотемпературными припоями- ПОС 40, ПСр 2,5 с применением косвенного нагрева и охлаждением контакта водоохлаждающим прижимом.

Испытания контактов с медными и бронзовыми основами и серийных КМК-АЗ0м/КМК-А10м в контактном узле многоамперного выключателя в режиме коммутации (7000 циклов "ВО") тока $I = 100$ А при напряжении 0,4 В и нажатиях 2,7 кГс показало, что переходное сопротивление их практически одинаково: 0,24-0,48 мОм и 0,33-0,38 (ПЖМК с медной и бронзовой основой), соответственно 0,24-0,45 (серебросодержащие контакты).

Механическая износостойкость ПЖМК проверялась на установке МАК-В100 в режиме: $I_{\text{вкл}} = 100$ А, отключение без тока. После 20000 циклов износ составил $1,17-1,21 \cdot 10^{-6}$ Г/цикл, что находится на уровне износа серебросодержащих контактов.

Переходное сопротивление контактов на медной и бронзовой основах исследовали в автоматических выключателях ВА 60-26 ($I_N = 32$ А, $U = 220$ В, $F = 0,3$ кГц) и АЗ10 ($I_N = 160$ А, $U = 380$ В, $F = 2,5$ кГц) при испытании в тепловом режиме. Переходное сопротивление составило 0,19-0,22 и 0,13-0,15 мОм соответственно.

Проведенные испытания в продолжительном режиме в токоограничивающих блоках ВА 52-35 (вместо пары КМК-А10м), показали, что разницы в температуре и падения напряжения на контактах ПЖМК и серебросодержащих нет. Испытания на ПКС в трехфазной цепи ($U = 660$ В, $I = 15,6$ кА, 0-ВО-ВО) показали сваривание контактов после отброса, но несмотря на это, отключение происходило нормально (рис. 7).

Таким образом, ПЖМК могут использоваться в токоограничивающих устройствах и многоамперных выключателях, причем, вновь разрабатываемые аппараты будут менее энергоемкие, а следовательно, меньших материалоёмкости и габаритов.

Пятая глава посвящена разработке и испытаниям дугостойких серебросодержащих контактов. В соответствии с требованиями к материалу,

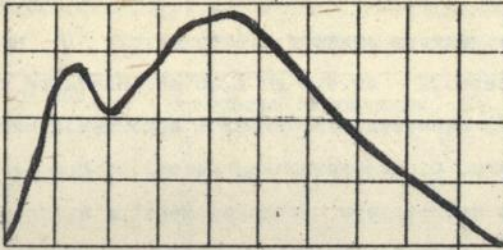
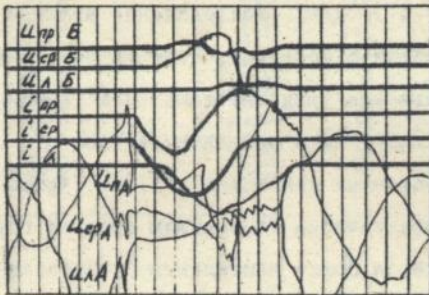
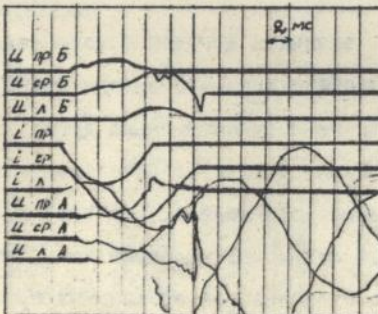


Рис.6. Осциллограмма падения напряжения на контактах при пропускании сквозного тока 15,6 кА, $F = 3$ кГц.



а) первое отключение



б) второе отключение

Рис.7. Осциллограммы процесса отключения токов КЗ (ВА 52-35, $I_n=250$ А)

Масштабы токов и напряжения

ИБ- на блоке,

ИА - на выключателе.

M_i лев = M_i ср = M_i пр = 1000 А/м

M_u лев.Б = 30 В/мм

M_u ср.Б = M_u пр.Б = 23 В/мм

M_u лев.А = 22 В/мм

M_u ср.А = 24 В/мм

M_u пр.А = 25 В/мм

изложенным в главе второй, в качестве активатора выбраны окись и гидрокись бария. Оба активатора снижают работу выхода φ никеля от 4,5 до 1,52-2,6 эВ, серебра - от 4,3 до 1,56 эВ. Контакты композиции серебро-никель (30 %) изготавливали методом порошковой металлургии. Исследования показали, что дезактивация наступает при температуре $\leq 1000^\circ\text{C}$, т.е. ниже температуры плавления серебра и, тем более, никеля, который как раз и является активирующимся компонентом. Показано, что скорость движения дуги на активированных электродах выше в 1,2-2,6 раза, чем на чистых металлах; разница в скоростях увеличивается с увеличением тока дуги и напряженности магнитного поля (в исследованном диапазоне 3-17 А, $5 \cdot 10^3$ - $1 \cdot 10^4$ А/м). Исследования времени горения дуги проводились на установке с контуром, содержащим магнитное дутье и сдвигогасительными рогами для трех значений тока (амплитудные значения 3,7; 7,3; 10 кА). Результаты приведены в табл.2. Важно отметить, что эрозия активированных контактов в 1,3-2,7 раза меньше, чем неактивированных при практически одинаковом времени горения дуги на контактах. Это объясняется более длительным существованием катодных пятен I типа, что подтверждается и характером эрозии - у неактивированных контактов рабочая поверхность оплавлена и покрыта глубокими кратерами с оплавленными краями, у активированных наблюдаются только микрократеры.

Исследованиями показано, что величина дуговой эрозии зависит от наличия магнитного дутья; при отсутствии такового эрозия может даже увеличиваться за счет увеличения времени существования дуги.

Показано, что кристаллогидрат бария действует эффективнее окиси. Рентгенографическими исследованиями установлено, что даже в процессе спекания (900°C) кристаллогидрат сохраняет молекулы воды; не исключено, что этот факт оказывает свое влияние на эрозионный процесс.

Испытания на ПКС и коммутационный износ проводили в автоматических выключателях ВА 60-26 ($I_n=32$ А, 16 А), где вместо пар КМК-А30М КМК-А41 использовали пары разработанных композиций типа СБ 30 * (акти-

Таблица 1.

Зависимость прочности сваривания контактов от контактного нажатия и сквозного тока.

Сквозной ток, кА	Прочность сваривания, кгс при контактном нажатии				
	5	3	2,5	1,5	1,5
1,6	0	0	0	не опр.	не опр.
1,6	0	0	0	то же	то же
1,6	0	не опр.	0	"	"
2,6	0	то же	0	"	"
2,6	0	"	0	"	"
4,6	0	0	0	"	"
4,6	0	не опр.	не опр.	"	"
6,6	0	то же	то же	"	"
6,6	0	"	"	"	"
7,6	0,5	0	0	"	"
7,6	2,0	3	не опр.	0	0
9,6	1,5	0	то же	0	0
9,6	1,5	4	"	0	0
11,6	3,0	0	0	0	0
11,6	7,0	4	не опр.	0	0
13,6	9,0	0	0	0	0
13,6	15,0	0	не опр.	0	0
13,6	не опр.	не опр.	то же	0	100 отброс
15,6	10,0	0	0	90 отброс	
15,6	14,0	0	100 отброс		

Таблица 2.

Удельный дуговой износ, время горения дуги, расстояние между контактами при коммутации больших токов (3-5 измер.)

Материал контактов	Ток, I (амплитудное значение), кА								
	3,7			7,3			10,0		
Параметры процесса									
	Цд	тд	Хк	Цд	тд	Хк	Цд	тд	Хк
	Г/ч	с	мм	Г/ч	с	мм	Г/ч	с	мм
Ni	0,078	7,2	4,9	0,095	3,3	5,0	0,123	2,3	4,2
Ni *	0,029	7,0	5,0	0,068	3,6	5,5	0,069	2,3	4,2
СН30	0,106	7,2	4,9	0,173	3,8	6,1	0,151	2,4	4,4
СН30 ж	0,048	7,5	5,1	0,112	3,8	5,5	0,123	2,8	5,4

* - активированные контакты.

виреванные), износ значительно меньше, чем серийных контактов. В ВА 57-31 ($I_n=100$ А) контакты (в паре с КМК-А10м) выдержали 7 отключений действующих токов от 15,6 до 55 кА; в разрабатываемом автомате-пускателе на номинальный ток 32 А - 10,19 и 46 кА. Величина эрозии заметно меньше, чем у пар КМК-А30м-КМК-А10м; КМК-А30м/КМК-А41; КМК-А10м/КМК-А10м иной и характер эрозии (рис.8.). Контакты (пары $CN \equiv -CN \equiv$ вместо КМК-А30м/КМК-А10м выдержали также испытания на ПКС в ВА 51-35 ($I_n=250$ А) и полный цикл испытаний в выключателе ВА 50-41 ($I_n=1000$ А) выполненный испытательным центром ПО "Контактор" (г. Ульяновск). Здесь износ при коммутационных испытаниях оказался в 1,5-2,5 раза меньше, чем у применяющихся КМК-А30м/КМК-А10м, что показало техническую, экономическую целесообразность использования нового материала.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны составы бессеребряных псевдожидкометаллических контактов, реализующих принципы, заложенные в а.с. № 1579317.Н01, Н 1/02 и обеспечивающих низкое - на уровне серебросодержащих серийных контактов переходное сопротивление и высокую в 4-6 раз выше электродинамическую устойчивость. Материал не содержит драгоценных, редких или остродефицитных а также токсичных компонент. Предназначен для использования в аппаратах с бездуговой коммутацией тока (в токоограничивающих устройствах, в главных контактах многоамперных автоматических выключателей). Достаточная эрозийная стойкость позволяет в 3-15 кратное отключение токов короткого замыкания без изменения свойств материала. Сваривание контактов после отброса при протекании токов КЗ (при малом контактном нажатии) не приводит к потере работоспособности аппаратов в связи с мгновенным - в течение 1-2 мс - расплавлением сварившихся зон при повторном протекании токов КЗ.

Преимущества нового бессеребряного материала, особенно по элек-

тродинамической устойчивости, в наибольшей степени скажутся на уменьшении материалоемкости и массогабаритных показателей аппаратов за счет уменьшения необходимых контактных нажатий и уменьшения (устранения) электродинамических компенсаторов.

2. Намечены, опробованы пути повышения дугостойкости ПЖМК для использования его в коммутационных аппаратах на токи до 160 А при напряжении 220-380 В.

3. На уровне изобретения разработаны принцип и составы серебросодержащих контактов высокой дугостойкости, обеспечиваемой особыми эмиссионными свойствами рабочей поверхности контактов за счет особого характера эрозии (без глубоких кратеров оплавления). Контакты обладают низкой склонностью к свариванию и предназначены для всех типов аппаратов с дуговой коммутацией тока. Материал не требует существенных изменений технологии изготовления контактов и крепления их к контактодержателям. Применение его позволяет повысить технические характеристики аппаратов (ПКС) или сэкономить остродефицитное серебро (20-40 %) за счет уменьшения размеров контактов.

4. Разработанные технологии изготовления бессеребряных ПЖМК и серебросодержащих- высокой дугостойкости контактов применимы для промышленного внедрения, т.к. учитывают технологические особенности и возможности имеющегося оборудования предприятий.

5. Новые контактные материалы прошли испытания на ПКС: автоматическом выключателе ВА 57-31 ($I_n=100$ А), в автомате-пускателе ($I_n=32$ А), в автоматическом выключателе ВА 51-35, ВА52-35 ($I_n=250$ А) на коммутационный износ- в автоматическом выключателе ВА 50-41 ($I_n=1000$ А). В настоящее время контакты проходят испытания по международным стандартам в контакторах *SLL-3* ($I_n=160$ А), автоматических выключателях АР1-50 ($I_n=1600$ А) и *DS-420* ($I_n=4000$ А) фирмы "Алена" (Польша). Подготавливается решение о внедрении дугостойких контактов в автоматические выключатели серии ВА 50-41 ($I_n=1000$ А, г. Ульяновск).

Основное содержание работы опубликовано в следующих работах:

1. Крыгина Т.П., Галоненко Г.Н. и др. Новый контактный материал и перспективы снижения массогабаритных показателей НВА. - Состояние и перспективы развития производства аппаратов низкого напряжения. У1 Всесоюзная науч-техн. конференция. Харьков, 1990 г.

2. Крыгина Т.П., Павленко Ю.П., Галоненко Г.Н. и др. Испытания нового дугостойкого контактного материала в автоматических выключателях и контакторах. - Состояние и перспективы развития производства аппаратов низкого напряжения. УП Всесоюзная научно-техническая конференция. Харьков. 1990 г.

3. Крыгина Т.П., Павленко Ю.П., Галоненко Г.Н. и др. Дугостойкий электрический контакт. Заявка № 5022921/07 (002650). Решение о выдаче патента 20.01.92, патента РФ 16.02.93 г.

4. Крыгина Т.П., Павленко Ю.П., Вайнблат Т.И. и др. Способ изготовления контактного узла электрического аппарата. Заявка № 5034374/07 (015351). Решение о выдаче патента 20.07.92 г., патента РФ 18.04.93 г.

5. Крыгина Т.П., Павленко Ю.П. и др. Электрические контакты высокой эрозийной стойкости. - Низковольтные аппараты управления и защиты. Сб. науч. тр. Харьков, 1993 г.

6. Галоненко Г.Н., Крыгина Т.П., Павленко Ю.П. и др. Новый контактный материал для многоамперных выключателей. - Низковольтные аппараты управления и защиты. Сб. науч. тр., Харьков, 1993 г.

Федос

Asst. Secy

AB 27.901