

На правах рукописи



Кудюкин Александр Игоревич

**БЕСШТЕНГЕЛЬНОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ
МОЩНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ
ВАКУУМНЫХ ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕР**

Специальность 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина».

Научный руководитель: **Степанов Владимир Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей и теоретической физики и МПФ -
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина»

Официальные
оппоненты: **Привалов Вадим Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики -
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Мольков Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры электроники и электроэнергетики -
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет»

Ведущая организация: ООО «НПП «Мелитта», г. Москва

Защита диссертации состоится «12» марта 2024 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.02 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «__»_____2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.375.02
доктор физико-математических наук, доцент



Литвинов Владимир Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень разработанности. Вакуумные дугогасительные камеры (КДВ) являются основными элементами современных устройств, обеспечивающих автоматизированную коммутацию силовых цепей (до 100 кА) высоковольтных (до 100 кВ) электрических цепей переменного тока. Камеры широко применяются в энергетике, на транспорте, в горно-рудном деле, в нефтегазодобыче. Коммутация производится как при штатном замыкании или размыкании мощных цепей, так и при аварийном прерывании тока для защиты мощного дорогостоящего электрооборудования.

КДВ представляют собой изделие, в которых обеспечивается высокий вакуум (давление около 10^{-5} мм рт. ст.). Оболочка камеры выполнена из высокопрочной керамики, которая герметично соединяется с металлическими участками оболочки путем пайки твердыми припоями. Характерные массогабаритные показатели КДВ: диаметр корпуса – (100 – 200) мм, длина – (160 – 500) мм, вес – (3 – 50) кг.

Откачка приборов еще недавно велась через штенгель. Сегодня чаще применяется «бесштенгельная» технология откачки, при которой газы удаляются через щели между узлами конструкции камеры и корпусом (керамической оболочки). После окончания откачки производится пайка узлов камеры и обеспечивается окончательная герметизация изделия. Такая технология принципиально является более производительной, поскольку позволяет осуществлять «групповой» способ откачки приборов. Однако, для крупногабаритных камер до сих пор используется штенгельный способ.

Контактные материалы (КМ) электродов КДВ, представляют собой сложные композиции, изготавливаемые в основном методами порошковой металлургии. Основу композиций составляют медь и хром. Структура и свойства композиций могут существенно изменяться в процессе работы приборов за счет интенсивных термических процессов при разрыве больших токов. Долговечность и надежность КДВ определяются, в основном, свойствами КМ.

Результаты диссертационной работы направлены на создание и применение надежных металлокерамических высоковольтных дугогасительных камер на 110 кВ, расширяющих области применения их в энергетике, и развитие современных промышленных технологий, обеспечивающих импортозамещение самых надежных и самых дешевых всего класса металлокерамических дугогасительных камер. В работе исследуются особенности технологий пайки и откачки приборов, контроля вакуума и герметичности готовых изделий. Методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и электронного микронного анализа (РСМА) совместно с растровым наблюдением микрорельефа поверхности, осуществляемым с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV, изучаются изменения морфологии поверхности и состава композиционного контактного материала Cu-Cr (его деградация) в условиях интенсивных энергетических потоков. Поэтому тема работы является актуальной и важной для практики.

Цель работы заключается в увеличении рабочего ресурса вакуумных дугогасительных камер до 30% и промышленной реализации бесштенгельной групповой откачки и сборки крупногабаритных высоковольтных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер.

Основные задачи диссертационного исследования. Для достижения цели необходимо было решить следующие основные задачи.

1. Отработка технологического процесса групповой двухстадийной сборки

опытных образцов крупногабаритных мощных металлокерамических камер типа КДВ-110 с использованием операций пайки высокотемпературными (до 900°C) припоями и одновременного вакуумирования и герметизации бесштенгельным способом в современных компьютеризованных водородных и вакуумных печах с большими рабочими объемами в производственных условиях.

2. Для приборов, прошедших полный цикл испытаний, получить и проанализировать данные о составе контактных материалов КДВ на характерных участках поверхности и приповерхностных слоях с целью выявления деградиационных процессов, вызываемых дугой в вакууме, и поиска путей повышения долговечности и надежности приборов.

Научная новизна работы определяется её следующими результатами.

1. Подтверждено, что использование бесштенгельной технологии изготовления металлокерамических вакуумных дугогасительных камер с рабочим напряжением 110 кВ на базе высокопроизводительного вакуумного крупногабаритного оборудования обеспечивает повышение вакуумной чистоты с 10^{-4} Па (штенгельный способ) до 10^{-6} Па (бесштенгельный способ) при откачке и пайке в процессе изготовления электровакуумного прибора.

2. Установлено, что система управления водородной печи с камерой пайки в диапазоне температур 25 – 910 °C при подаче водорода с низу печи наверх и введения внизу печи водяного охлаждения обеспечивает необходимое равенство температур во всех зонах водородной печи при плавлении припоя, снижая градиент температуры в камере (с 14 °C до 3-4 °C), и обеспечивает устойчивую работу технологического процесса производства изделий.

3. В дугогасительной вакуумной камере при возникновении электрической дуги происходит плавление материала катода на основе медно-хромового сплава (60% - медь; 40% - хром), сегрегация атомов меди вследствие большей подвижности по сравнению с хромом при окислении атомов и перераспределение элементного состава поверхности катода в исследуемых образцах.

4. Впервые с помощью метода атомно-силовой микроскопии и электронного микросондового анализа на электронных изображениях микрорельефа расплавленной поверхности медно-хромового катода обнаружен эффект миграции атомов меди при плавлении поверхности к краю в область более низких температур катода.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Внедрена бесштенгельная технология изготовления металлокерамических вакуумных дугогасительных камер с рабочим напряжением 110 кВ на базе высокопроизводительного оборудования, что обеспечило большую (по количеству приборов) загрузку вакуумной печи, что значительно (в 1,5 – 2 раза) сокращает суммарное время откачки, пайки и изготовления электровакуумных приборов.

2. Разработан способ откачки и герметизации КДВ в вакуумной печи с использованием дополнительной операции - выдержки с длительностью, достаточной для откачки газа из объема камер через не запаянные швы (при температуре не более 100 °C), что позволило применять бесштенгельную технологию для изготовления КДВ большого размера (на напряжение 110 кВ).

3. Рассчитано время (14 минут) снижения давления внутри КДВ-110 в результате молекулярного истечения через щели остаточного газа, исключаяющего процесс окисления деталей камер.

4. Разработана новая конструкция электродов, содержащая дополнительные слои меди в структуре, созданная на основе анализа динамики перераспределения основ-

ных элементов (Cu, Cr, O) на поверхности электродов, что увеличило ресурс вакуумной дугогасительной камеры на 44%.

5. Создана технология производства групповым (бесштенгельным) методом мощных высоковольтных (на 110 кВ) металлокерамических вакуумных дугогасительных камер.

Методы исследований и достоверность результатов. В экспериментальных исследованиях использовалось поверенное измерительное и технологическое оборудование. Достоверность результатов подтверждается совершенствованием инновационных технологий и методик в области вакуумной, газоразрядной и твердотельной электроники, компьютерного проектирования и моделирования, базирующиеся на физических основах этих областей науки и техники и математических, включая численные, методах обработки результатов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Технология бесштенгельного изготовления металлокерамических дугогасительных камер на 110 кВ в вакуумных системах с объемом камеры откачки и пайки до 9 м³.

2. Применение групповой сборки крупногабаритных металлокерамических дугогасительных камер типа КДВ-110 с пайкой высокотемпературными (до 900°C) припоями и одновременным вакуумированием и герметизацией бесштенгельным способом в водородных и вакуумных печах обеспечивает значительное (более 20%) повышение выхода годных изделий.

3. Перевод подачи газов из нижней в верхнюю зоны водородной печи и установка водяного подогрева нижней зоны позволяют снизить градиент температуры с 14 °C до (3 – 4) °C и сократить время изготовления электровакуумных приборов с 50 минут до 40 минут.

4. Нанесение на электроды вакуумной дугогасительной камеры дополнительного слоя меди позволяет увеличить ее ресурс на 44%.

Личный вклад автора. Автор диссертации осуществлял постановку экспериментов и их проведение, обработку и интерпретацию экспериментальных результатов, в частности, получил данные о микрорельефе поверхности до и после проведения цикла испытаний приборов, описал природу физико-химических процессов перераспределения элементного состава исследуемых образцов, которое вызывается эрозией контактов под действием дугового разряда в вакууме, провел анализ литературных источников по теме диссертации. Автор совместно с научным руководителем определял направление и задачи исследований, лично разрабатывал методы исследования. Автор участвовал в написании статей, представлениях результатов работы на научно-технических конференциях и семинарах. Все основные результаты диссертационной работы, включая положения, выносимые на защиту, получены автором лично или в составе группы.

Апробация результатов исследования.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: 11 International Vacuum Electron Sources Conference (Сеул, 2016); XXIII Международная научно-практическая конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Москва, 2017); XLVII Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2017); XIV Международный семинар «Структурные основы модифицирования материалов» (Обнинск, 2017); XXV Международная конференция лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, гео-

экологии и транспорте (Новороссийск, 2017); XXI конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (Москва, 2018); Всероссийская научно-методическая конференция «Актуальные проблемы преподавания физики в школе и вузе» (Рязань, 2018); XXV Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2018» (Москва, 2018); XLVIII Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2018); XV Международной научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (Москва, 2018); Всероссийская научно-методическая конференция «Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве» (Рязань, 2019); XXVI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2019» (Москва, 2019); XLIV Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2019); XV Международный семинар «Структурные основы модифицирования материалов» (Обнинск, 2019); XXIV Международная научно-практическая конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Москва, 2019), II Всероссийская научно-практическая конференция "Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве" (Рязань, 2020); III Всероссийская научно-практическая конференция "Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве" (Рязань, 2021); Global Conference & Expo on Materials Science & Engineering (Берлин, 2022); LII Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2023).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 25 работы, в том числе – 5 статей в журналах из перечня ВАК РФ рецензируемых научных журналов или включенных в международную базу научного цитирования Scopus.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы. Материал изложен на 194 страницах, включает 19 таблиц, 85 рисунков и схем, а также два приложения. Список использованной информации содержит 101 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены степень разработанности темы, цели и задачи исследования, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, обоснована практическая значимость работы, приведены данные о реализации, внедрении, апробации, сведения о публикациях, структуре и объеме работы.

В первой главе представлены результаты анализа работ по вакуумным дугогасительным камерам. Приведены литературные данные о зависимости свойств дуги, проходящей в вакууме, от величины разрываемого тока, материала контактов и межэлектродного расстояния. Рассмотрены вопросы, связанные с развитием плазмы в вакууме, со свойствами вакуумной изоляции и с восстановлением электрической прочности после прекращения тока, с влиянием магнитного поля на формирование дуги, с электрической эрозией контактов. Изложены основные достижения в области технологии изготовления КДВ, контактных материалов и керамических изоляторов. Приведены сведения о типах и свойствах серийно изготавливаемых КДВ.

Характерное исполнение вакуумных дугогасительных камер – цилиндрические металлокерамические устройства. Для межэлектродной изоляции обычно применяется высокопрочная керамика. Неподвижный ввод выполняется в виде фланца с резьбо-

выми гнездами для подключения к токоведущей цепи. Внутри камеры контакты окружены металлическим экраном, предотвращающим ухудшение изоляционных свойств керамической оболочки в результате напыления металлов из разряда. Сильфон защищен экраном из нержавеющей стали от прожига каплями металла из зоны разряда. Конструкция КДВ и их внешний вид представлены на рисунках 1.1 и 1.2.

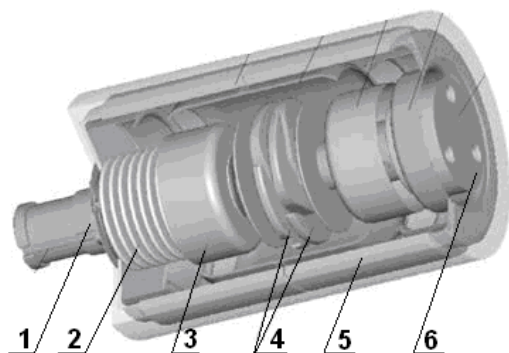


Рисунок 1.1. Схематическое изображение конструкции КДВ: 1 – подвижный электрод; 2 – сильфон; 3 – экран сильфона; 4 – контакты; 5 – керамический изолятор; 6 – неподвижный электрод



Рисунок 1.2. КДВ для силовых выключателей переменного тока, рассчитанных на напряжение от 0,4 до 35 кВ при токах отключения от 5 до 31,5 кА и номинальной силе тока от 400 до 2000 А

Детали камеры перед сборкой подвергаются тщательной очистке и затем соединяются пайкой твердыми припоями или сваркой в контролируемых защитных средах. Герметичность собранных узлов контролируется с помощью гелиевого масс-спектроскопического течеискателя. КДВ снабжены газопоглотителями. Собранные камеры в процессе откачки достаточно долго обезгаживаются при высокой (около 700 °С) температуре в печи.

На основе аналитического обзора сформулированы указанные выше задачи диссертационной работы.

Во второй главе изложены основные этапы совершенствования технологии изготовления высоковольтных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер типа КДВ-110, на основе проведенного в ходе выполнения диссертационного исследования. Работа проводилась в тесном взаимодействии с предприятием ООО «Вакуумные технологии» (г. Рязань), после кардинального расширения его материально-технической базы и значительного (в 2 раза) увеличения планируемого объема производства приборов под реальные заказы предприятий России в рамках федеральной программы импортозамещения.

До проведения настоящей работы камеры откачивались в основном через специальное приспособление (штенгель), что исключало возможность групповой обработки изделий с целью повышения производительности труда. При переходе на бесштенгельную откачку произведены изменения конструкции камер. Основными из них являются исключение штенгеля и формирование участка вакуумной оболочки для пайки финишного герметизирующего шва. Видоизмененная конструкция камеры представлена на рисунке 2.1.

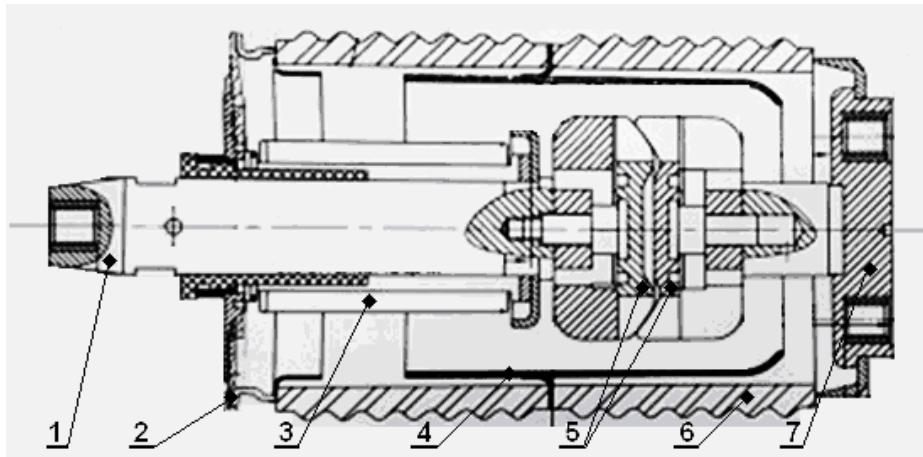


Рисунок 2.1. Схематическое изображение модернизированной конструкции дугогасительной камеры КДВ: 1 – подвижный электрод; 2 – финишный (герметизирующий) шов пайки; 3 – сильфон; 4 – экран; 5 – контакты; 6 – керамика; 7 – неподвижный электрод

Изолирующий участок вакуумной оболочки выполнен в виде цилиндра (6) из керамики (диаметр 270 мм, длина – около 500 мм, толщина – 10 мм). Цилиндр имеет две части, соединенные посредством пайки. В месте шва закреплен экран (4), предотвращающий запыление изолятора металлами из зоны разряда. Наружная поверхность керамики иногда профилирована для обеспечения высокой (до 110 кВ) электрической прочности. К торцам цилиндра припаиваются фланцы вакуумной оболочки. На левом фланце выполняется финишный герметизирующий шов (2). Внешний вид узлов конструкции (до пайки с керамической оболочкой) представлен на рисунке 2.2.

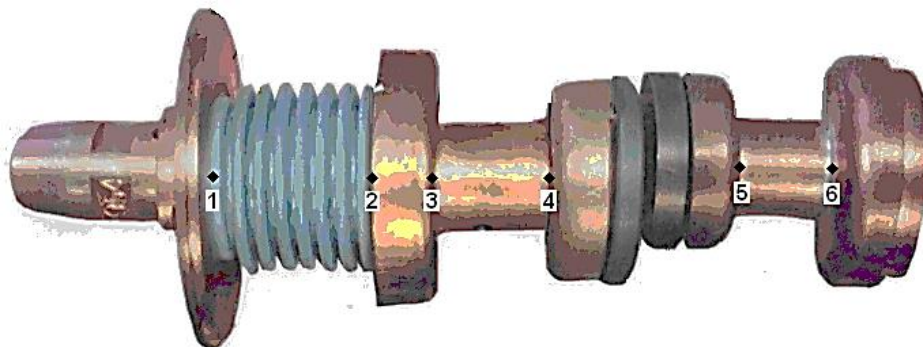


Рисунок 2.2. Внешний вид узлов конструкции камеры КДВ-110 (без керамического изолятора). Точками и цифрами обозначены места кольцевых швов пайки, соединяющих узлы

После загрузки заготовок и закрытия двери в печи проводится предварительная откачка атмосферы из объема вакуумной печи форвакуумным насосом до давления 6 мм рт. ст. (рисунок 2.3). На этом этапе откачка приборов в печи производится при открытых клапанах насосов 2 и 3. Форвакуумный насос и насос Рутса жестко закреплены между собой последовательно.

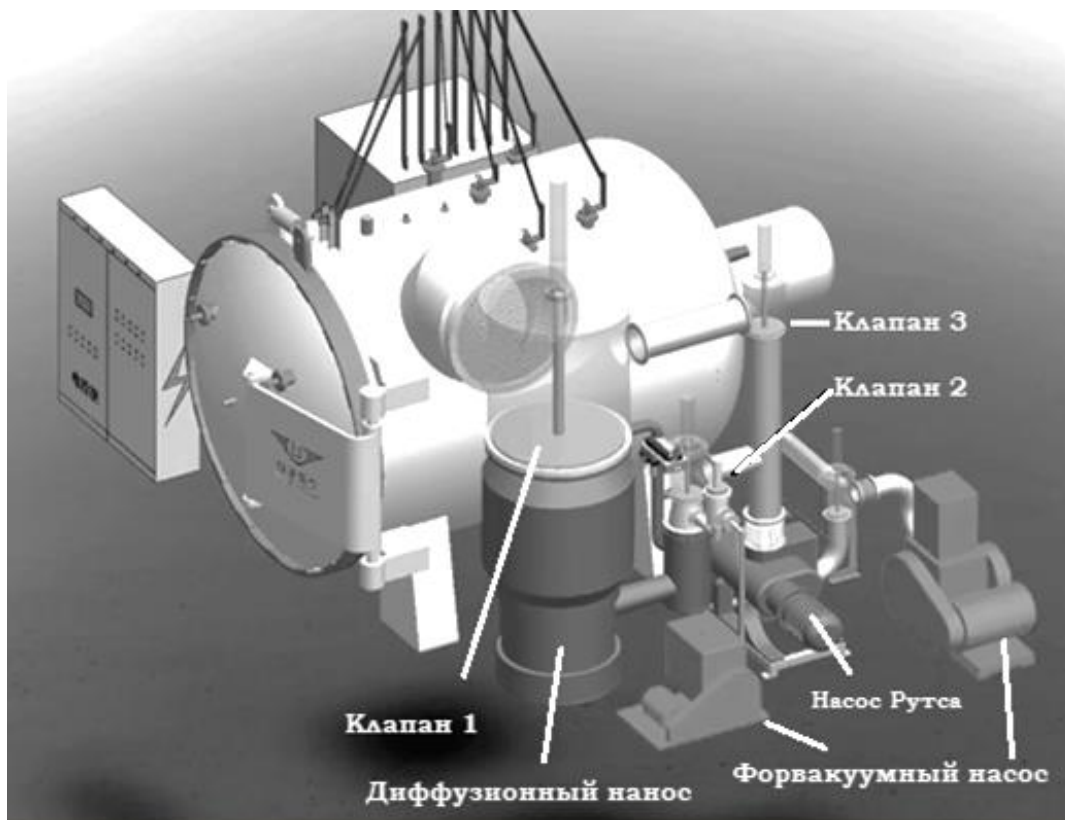


Рисунок 2.3. Система откачки вакуумной печи «Schment»: клапан 1 соединяет диффузионный насос с печью; клапан 2 – форвакуумный насос и насос Рутса с диффузионным насосом; клапан 3 – форвакуумный насос и насос Рутса с вакуумной печью

Реализация новой системы подачи газов в конструкцию водородной печи и водяного обогрева стала возможна после исследований и установления зависимости градиента температур внутри печи, что позволило снизить градиент температуры с $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $3 - 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и сократить цикл изготовления приборов на 10 минут.

Узлы конструкции, в основном, изготовлены из бескислородной меди, кроме сильфона (нержавеющая сталь) и контактов (композиция Cr-Cu). Детали узлов и узлы соединяются между собой, как правило, с помощью пайки медно-серебряным припоем ПСр-72, имеющим температуру плавления $779\text{ }^{\circ}\text{C}$. Исключение составляет пайка контактов к меди, которая выполняется с применением вольфрам-титанового припоя (температура плавления $910\text{ }^{\circ}\text{C}$), поскольку температура контактов в рабочем режиме может превышать значение, допустимое для припоя ПСр-72. Пайка контактов с медью производится в первую очередь, до пайки остальных деталей и узлов медно-серебряным припоем, в водородной печи типа «Scame». Температурные режимы операций пайки в водородной и вакуумной (Schment) печах характеризует рисунок 2.4.

На рисунке 2.4 а участок графика АВ соответствует нагреву деталей или узлов в водородной печи. Участок ВС – обезгаживающий отжиг, CD – подъем температуры до плавления припоя; DE – пайка; EF – охлаждение деталей.

На рисунке 2.4 б участок АВ соответствует откачке вакуумной камеры до давления порядка 6 мм рт. ст. ; участок ВС – выдержка при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ для удаления газов, выделяющихся из деталей; CD – подъем температуры и откачка диффузионным насосом до давления около $4 \cdot 10^{-4}\text{ мм рт. ст.}$; DE – обезгаживающий отжиг; EF – подъем температуры до плавления припоя; FG – пайка и герметизация камеры; GH – охлаждение печи.

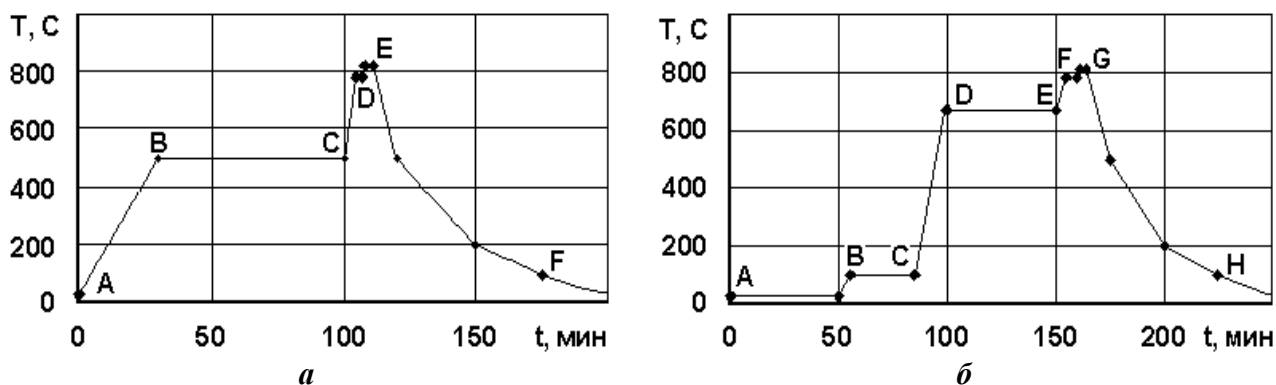


Рисунок 2.4. Температурные режимы пайки в водородной (а) и вакуумной (б) печах

Выдержка при температуре 100 °С (участок ВС на рис. 2.4 б) введена в ходе выполнения диссертационной работы. Длительность выдержки выбрана с учетом проведенной теоретической оценки скорости удаления газа через щели между прижатыми шероховатыми деталями в месте последующего образования финишного шва пайки. Выдержка необходима, поскольку через щели воздух удаляется медленно и быстрый подъем температуры может приводить к окислению деталей камеры.

Проводимость щелевого канала в молекулярном режиме определяется соотношением:

$$U = 116 \frac{ab^2}{l} \ln \frac{l}{b} \left[\frac{m^3}{c} \right] (b \ll a),$$

где b - высота щели; a - ширина щели; l - длина щели.

Время снижения давления остаточного газа (воздуха) внутри КДВ-110 в результате истечения через щель между собранными узлами от начального значения $P_0 = 3$ мм рт. ст. до конечного $P = 75 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. можно рассчитать по формуле:

$$t = \frac{V}{U} \ln \frac{P_0 - P_n}{P - P_n},$$

где V – внутренний объем камеры.

Полагая $a = b = 10^{-4}$ м; $l = 0,1$ см и $V = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м³, получим $t = 15$ минут.

В разработанной технологии обработки приборов в вакуумной печи изменен участок DE на рисунке 2.3 б – температура обезгаживания повышена с (400 – 450) °С до (650 – 700) °С, что существенно ускоряет газовыделение и сокращает время откачки с одновременным повышением качества изделий. С помощью компьютерной системы управления вакуумной печью реализован сложный ход спада температуры на участке GH (с применением ступенчатого принудительного охлаждения), обеспечивающий уменьшение механических напряжений в деталях и снижение вероятности растрескивания керамической оболочки.

Предлагаемый способ откачки и герметизации ВДК в вакуумной печи с использованием дополнительной операции - выдержки с длительностью, достаточной для откачки газа в молекулярно-кинетическом режиме из объема камер через незапаянные швы при температуре не более 100°С, позволяет применять бесштенгельную тех-

нологию для изготовления ВДК большого размера (на напряжение 110 кВ). При подъеме температуры выше 100°C может начаться процесс окисления деталей внутри ВДК из меди, хрома и нержавеющей стали в результате взаимодействия с остаточным газом, содержащим кислород.

Бесштенгельное производство крупногабаритных камер в печах большого объема, позволяет осуществлять одновременное изготовление 4-х камер КДВ-110, что значительно сокращает время изготовления и увеличивает производительность производства.

Важным моментом совершенствования производства КДВ является процесс пайки металло-керамических узлов и разработка после серии испытаний нового состава припоя ПСр-72, в него добавлена малая процентная доля никеля, что позволило производить пайку сильфона из нержавеющей стали с медным экраном исключив (впервые в России) из цикла производства процессы никелирования и меднения контактной поверхности сильфонов, необходимые для пайки с медным экраном. Что в свою очередь сократило производственный цикл на 20 минут и снизило затраты на комплектующие узлы (элементы).

Третья глава посвящена исследованию деградиционных процессов, протекающих на поверхности контактов дугогасительных камер под воздействием дуги, и поиску оптимальных методов и средств производства, позволяющих повысить эффективность приборов. Камеры предназначены для коммутации высокого переменного напряжения при токе около 2 кА (до 30 кА при разрыве тока в аварийном режиме).

В главе анализируется обоснованность применения многокомпозиционных электродных материалов, в частности, – сплавных систем (Cu 60 % - Cr 40 %). Требования к материалам контактов по электропроводности, механической и эрозионной устойчивости в условиях вакуумного дугового разряда очень разнообразны. Комплексу этих требований не удовлетворяет ни один из одноатомных металлов. Поэтому нашли применение специальные контактные материалы (КМ) сложного состава в виде многокомпонентных сплавов или в виде сложных композиций, изготавливаемых методами порошковой металлургии. В качестве основы КМ выбраны медь, железо и хром, имеющие температуру кипения менее 3300 °С, что исключало возможность возникновения интенсивной термоэлектронной эмиссии с поверхности электродов при горении дуги в вакууме в среде испаряющегося вещества. Поскольку КДВ обычно используются в цепях с переменным напряжением, пары материала быстро конденсируются на отрезке времени вблизи нулевого значения тока, и дуга гаснет. Но только при отсутствии интенсивной термоэмиссии, появление которой характерно для тугоплавких материалов.

В диссертационной работе методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и электронного микрозондового анализа (РСМА) совместно с растровым наблюдением поверхности с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV исследованы состав и микрорельеф электродов дугогасительной камеры до и после штатного испытательного режима с выработкой коммутационного ресурса.

Характерные изображения участков поверхности электродов (40x40 мкм²) до и после ресурсных испытаний прибора, полученные с помощью атомно-силового микроскопа, представлены на рисунке 3.1. Из представленных изображений следует, что неровности микрорельефа не превышают 800 нм и близко расположены друг к другу в зоне наблюдения (через единицы мкм).

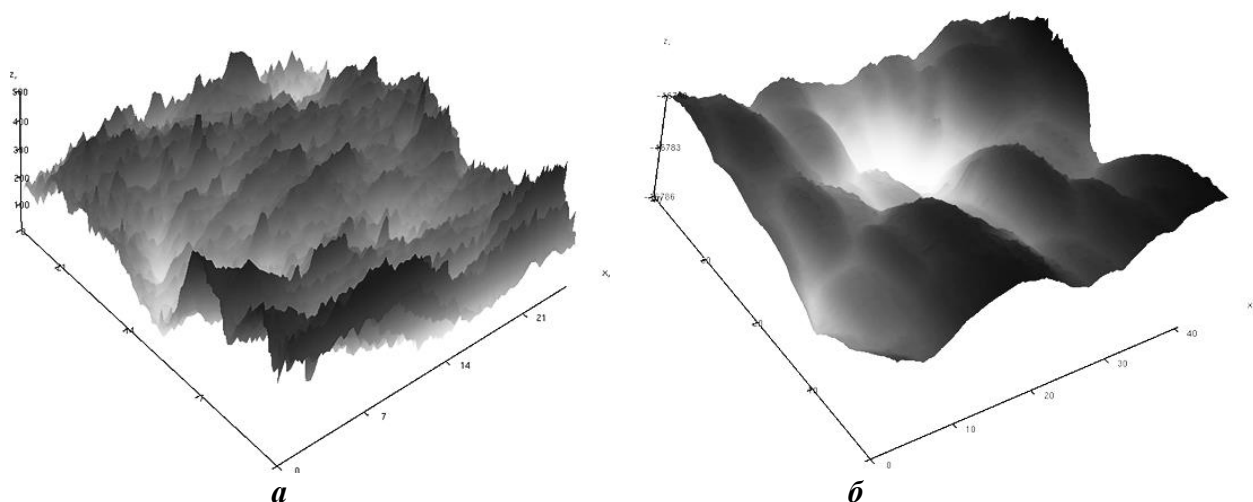


Рисунок 3.1. Изображения поверхности электродов до (а) и после (б) тестовых испытаний: компьютерные 3D-изображения участков с высотой микронеровностей в интервале (0 – 800) нм и (16786 – 16780) нм

На изображениях, полученных после ресурсных испытаний (рисунок 3.1), видно углубление с оплавленными краями, что свидетельствует о частичном перераспределении атомов вещества поверхностных и приповерхностных слоев электрода и десорбции с поверхности электрода в процессе испытаний.

С помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV исследована морфология поверхности контактов КДВ до и после ресурсных испытаний. В зоне исследования образцов турбомолекулярный насос обеспечивал вакуум около 10^{-7} мм рт. ст. Прибор позволял контролировать распределение компонентов материала по глубине. Глубина сбора информации до 2 мкм обеспечивалась при ускоряющем напряжении 30 кВ, а до 0,6 мкм – 15 кВ.

Полученные электронные изображения представлены на рисунке 3.2, из которых следует, что после длительной работы в штатном режиме с замыканием контактов при высоком напряжении и их размыканием с разрывом большого тока морфология поверхности существенно изменяется. Отчетливо видно множество оплавленных микровыступов с закругленными вершинами и углублений между ними. Такая картина возможна при «мостиковой» эрозии, при которой микровыступы перед размыканием контактов плавятся электрическим током, и жидкий металл «растягивается» в процессе расхождения электродов с образованием «мостиков». Когда мостик разрывается, его вершина округляется под действием сил поверхностного напряжения жидких металлов. Форма вершины сохраняется после охлаждения и затвердевания вещества.

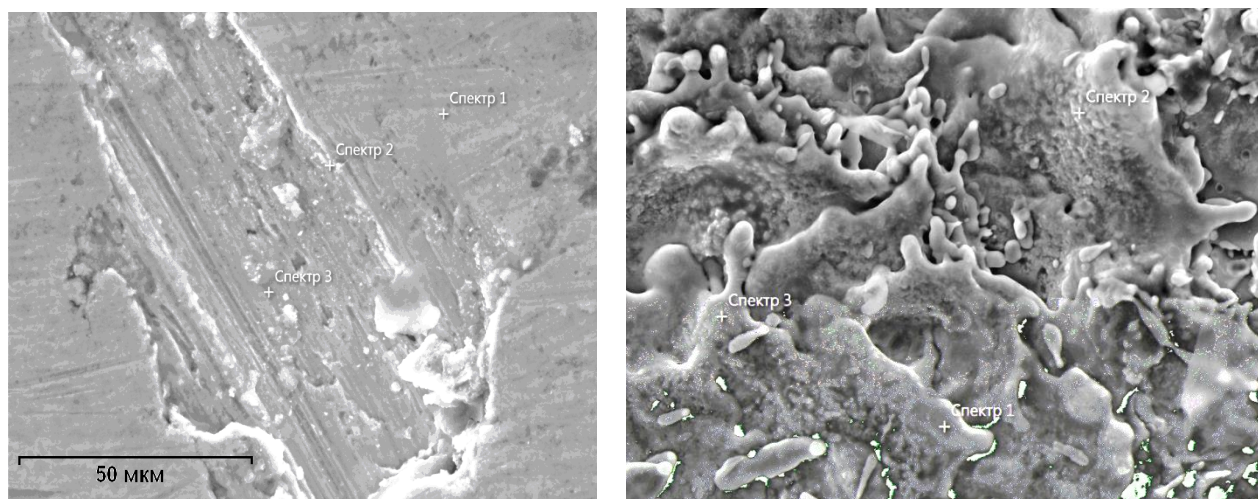


Рисунок 3.2. Микрофотография (электронное изображение) поверхностей контактов КДВ до и после ресурсных испытаний

Другой возможной причиной появления оплавленных микровыступов может быть автоэлектронная эмиссия с выступающих участков после размыкания контактов или при их сближении. Автоэлектронный ток и инициируемая им термоэмиссия расплавляет выступы, локальные участки поверхности электродов. Как следствие, возникновение электронных лавин (эктонов) с последующим развитием дугового разряда в парах электродных металлов. При этом вещество на локальных участках катода плавится за счет потенциальной энергии поступающих на них положительных ионов.

Энергия, выделяющаяся в зоне плавления металла, расходуется на термоэлектронную эмиссию (эмиссию надбарьерных электронов), на фазовые переходы первого рода (плавление и испарение) и на тепловой поток в объем электрода за счет теплопроводности. Наличие избыточной энергии приводит к резкому увеличению объема вещества и взрыву перегретой области с разбрызгиванием капель.

Сканирование поверхности контактов электронным зондом (с анализом элементного состава по глубине) позволило обнаружить зоны, в которых процентное содержание меди с увеличением глубины снижается от 92,4% до 78,2%. Это указывает на процесс сегрегации атомов к поверхности и объясняется тем, что температура плавления меди (1085 °С) значительно меньше, чем хрома (1857 °С) и разной поверхностной энергией этих элементов. В жидком состоянии коэффициент диффузии достигает больших величин (10^{-4} см²/с), и происходит заполнение поверхности сегрегирующими атомами Cu, концентрационное расслаивание сплава. Это вынуждает элементы концентрироваться в однородные области меди и хрома с одновременным уменьшением шероховатости поверхности. Установлено также, что при плавлении медь «растекается» от центра локальной области воздействия вакуумной дуги к зонам с более низкой температурой, что, вероятно, обусловлено физико-химическими свойствами металлов и их окислов.

При этом проведенное исследование показало, что концентрация кислорода в зоне плавления в 2 раза меньше, чем в соседних областях (2,2 % и 4,9 % соответственно), что обусловлено соединением атомов кислорода и меди в объеме материала, диффузией образовавшихся окислов к поверхности, разрушением связей молекул SiO на поверхности при высокой температуре и уходом атомов кислорода в

вакуумное пространство камеры.

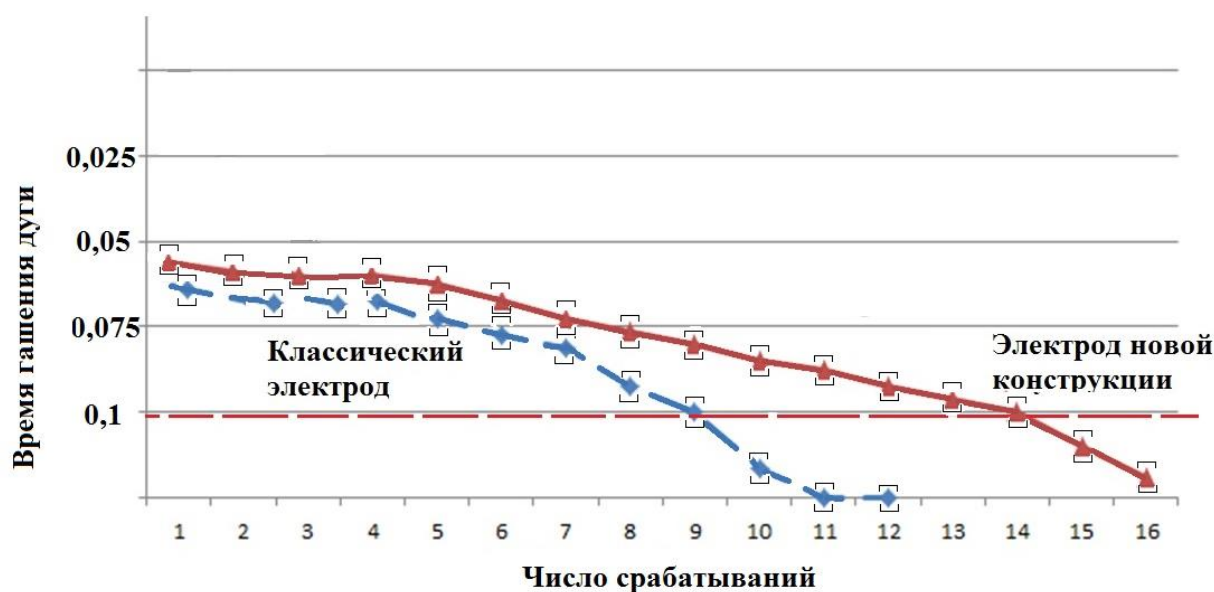


Рисунок 3.3. Испытание образцов КДВ-110 на срок службы

С учетом исследований и расчетов, показанных на рисунке 3.3 и испытаниями тестовых образцов нового вида электродов с дополнительными подслоями меди число коммутаций в режиме перегрузки увеличилось до 13 срабатываний, что соответствует увеличению ресурса камер, оснащенных новыми электродами, на 44%.

В приложениях представлены акты о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной работы.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

1. Проведена модернизация конструкции ряда типов КДВ, в ходе которой из состава прибора исключен штенгель и сформированы поверхности деталей, предназначенные для выполнения финишного (герметизирующего) шва пайки. Отработан технологический процесс групповой пайки в водородной печи композитного контактного материала на основе Cu-Cr, полученного методом порошковой металлургии, с электродами КДВ высокотемпературным (980 °C) вольфрам-титановым припоем, а также пайки-сборки деталей КДВ медно-серебряным припоем при температуре 815 °C в специальных оправках с контролируемым прижимом.

2. Выполнен оценочный расчет времени откачки воздуха из крупногабаритных металлокерамических КДВ через щели между контактирующими при пайке деталями, разделенными проволоочным кольцом припоя (до расплавления), от атмосферного давления до величины порядка 10^{-4} мм рт. ст., при которой не происходит интенсивное окисление деталей. В расчете учтены высота, ширина и длина суммарной (по всей длине кольца припоя) условной щели, определенной по характерным значениям шероховатости поверхностей, а также объем КДВ. Полученное значение времени использовано для обоснования режима повышения температуры в вакуумной печи.

3. Разработана бесштенгельная технология откачки приборов через щели финишного шва (до пайки) с обезгаживанием деталей при повышенной (700 °C) темпе-

ратуре с последующей герметизирующей пайкой медно-серебрянным припоем. Технология реализована с помощью большеобъемной (0,6 м³) вакуумной печи типа «Schment», позволяющей проводить групповую обработку крупногабаритных металлокерамических приборов. Показана необходимость начальной выдержки приборов при низкой (100 °С) температуре для удаления воздуха и предотвращения окисления деталей. С помощью компьютерной системы управления печью обеспечен режим охлаждения приборов, исключающий появление микротрещин вакуумной оболочки.

4. Показано, что в условиях производства использование бесштенгельной конструкции крупногабаритных металлокерамических дугогасительных камер и их бесштенгельной групповой откачки обеспечивает большую (по количеству приборов) загрузку вакуумной печи, значительное (в 2 раза) сокращение времени откачки и пайки (в расчете на одну камеру), повышение производительности труда и существенное снижение себестоимости изделий.

5. С помощью методов атомно-силовой микроскопии, электронного микрозондового анализа и растровой электронной микроскопии проведен сопоставительный анализ состояний контактирующих материалов на основе композиции Cr-Cu до и после цикла испытаний. Получены характерные изображения микрорельефа поверхности. Описана природа физико-химических процессов перераспределения элементного состава исследуемых образцов, вызываемого эрозией контактов под действием вакуумного дугового разряда при их замыкании и размыкании.

6. Показано, что при возникновении дуги в вакууме, в ходе нагрева, плавления и испарения материала электрода, происходит «растекание» меди от центра разрядного канала к зонам с более низкой температурой, что вынуждает элементы концентрироваться в однородные области меди и хрома. Отмечено, что концентрация кислорода в зоне плавления в 2 раза меньше, чем в соседних областях, что обусловлено соединением атомов кислорода и меди в объеме материала, диффузией образовавшихся окислов к поверхности, разрушением связей молекул CuO на поверхности при высокой температуре и уходом атомов кислорода в объем камеры.

7. Создана технология производства групповым (бесштенгельным) методом мощных высоковольтных (на 110 кВ) металлокерамических вакуумных дугогасительных камер.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в научных журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий ВАК РФ:

1. Горохова В.Г. Бесштенгельные технологические процессы для производства металлокерамических вакуумных дугогасительных камер (КДВ-110) [Текст] / В.Г. Горохова, А.Т. Ротт, А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос, В.А. Степанов, Л.Ю. Сятишева // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2017. № 61. С. 164–169.

2. Кудюкин А.И. Особенности эволюции морфологии поверхности электродов лазера в плазме газового разряда [Текст] / А.И. Кудюкин, П.А. Борисовский, С.В. Гаврилов, М.Н. Махмудов, Е.Н. Моос, Г.В. Киселев, Л.И. Киселева, В.А. Степанов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2017. №4 (10). С. 92–98.

3. Кудюкин А.И. Модификация поверхности электродов в вакуумной дуге в зоне взрывного плавления [Текст] / А.И. Кудюкин, М.Н. Махмудов, Е.Н. Моос, В.А. Сте-

панов // Изв. РАН. Сер. физ., 2020. № 6 (84). С.898-901.

4. Kudyukin A.I. Electrodes of a Vacuum Chamber under the Action of an Arc in the Explosive Melting Zone [Текст] / A.I. Kudyukin, M.N. Makhmudov, E.N. Moos, V.A. Stepanov // Technical Physics, 2020.vol. 65, pp. 1163–1166.

5. Kudyukin, A. Surfaces of cohesive bonds' fracture in the multilayer systems: A comparative analysis [Текст] / Ilyasowa, N., Kondrakova, O., Kudyukin, A. and Moos, E // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, 2022. vol. 15, no. 1, pp. 62–69. DOI 10.18721/JPM.15106

Статьи и доклады

1. Kudyukin A.I. Arc interaction with electrodes [Текст] / A.I. Kudyukin, E.N. Moos, A.T. Rott, N.B. Rybin, V.A. Stepanov // Proceed. 11th Intern. Vac. Electr. Sourc. Conf. Seoul National University (SNU). 2016. P. 41-42.

2. Kudyukin A.I. Technology and Physics Features of Vacuum Interrupters Production [Текст] / A.I. Kudyukin, E.N. Moos, A.T. Rott, N.B. Rybin, V.A. Stepanov // Proceed. 11th Intern. Vac. Electr. Sourc. Conf. Seoul National University (SNU). 2016. P. 113-114.

3. Кудюкин А.И. Модифицирование поверхности электродов вакуумным дуговым разрядом [Текст] / А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос, А.Т. Ротт, Н.Б. Рыбин, В.А. Степанов // Труды XXIII Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью». 2017. С. 267-270.

4. Кудюкин А.И. Модификация поверхности электродов в вакуумной дуге в зоне взрывного плавления [Текст] / А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос, А.Т. Ротт, Н.Б. Рыбин, В.А. Степанов // Труды Международной Тулиновской конференции ФВЗЧК – 2017. 2017. С. 128.

5. Кудюкин А.И. Результаты физико-химических превращений процессов на поверхности электродов под действием плазмы вакуумной дуги [Текст] / А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос, А.Т. Ротт, В.А. Степанов // Труды Международного семинара МНТ-XIV «Структурные основы модифицирования материалов». 2017. С. 40-42.

6. Борисовский П.А. Эрозия поверхности электродов плазмой разряда [Текст] / П.А. Борисовский, С.В. Гаврилов, М.Н. Махмудов, Е.Н. Моос, Г.В. Киселев, А.И. Кудюкин, В.А. Степанов // Труды XXI Конференции взаимодействие плазмы с поверхностью. 2018. С. 130-132.

7. Гаврилов С.В. Воздействие дугового разряда на электроды [Текст] / С.В. Гаврилов, А.И. Кудюкин, М.Н. Махмудов, Е.Н. Моос, В.А. Степанов // Труды XV Международной научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия». 2018. С. 270-274.

8. Степанов В.А. Модификация поверхности электродов вакуумным дуговым разрядом [Текст] / В.А. Степанов, А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос, Н.Б. Рыбин, А.Т. Ротт, К.Е. Серёгин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2018. № 64. С. 128-131.

9. Кудюкин А.И. Технологический режим пайки и бесштенгельной откачки металлокерамических дугогасительных камер [Текст] / А.И. Кудюкин, М.Н. Махмудов, Е.Н. Моос, А.Т. Ротт, К.Е. Серёгин, В.А. Степанов, Л.Ф. Сятишева // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2018. № 64. С. 132-136.

10. Кудюкин А.И. Контроль герметичности вакуумных дугогасительных камер [Текст] / А.И. Кудюкин // Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве. 2019. С. 116-118.

11. Кудюкин А.И. Контроль герметичности и натекания газов и анализ испаряемых частиц в дугогасительных камерах квадрупольным масс-спектрометром

[Текст] / А.И. Кудюкин // Труды XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». 2019. С. 62-64.

12. Кудюкин А.И. Анализ распыленных и осажденных частиц при производстве вакуумных дугогасительных камер квадрупольными системами [Текст] / А.И. Кудюкин, М.Н. Махмудов, Е.Н. Моос, В.А. Степанов // Труды Международной Тулиновской конференции ФВЗЧК- 2019. 2019. С. 68.

13. Кудюкин А.И. On arc vacuum discharge modification surface [Текст] / А.И. Кудюкин, М.Н. Махмудов, Е.Н. Моос, В.А. Степанов // Труды Международной Тулиновской конференции ФВЗЧК- 2019. 2019. С. 159.

14. Кудюкин А.И. Импульсное ионно-плазменное воздействие на сплавные поверхности электродов [Текст] / А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос, М.Н. Махмудов, В.А. Степанов // Труды Международного семинара МНТ-ХV «Структурные основы модифицирования материалов». 2019. С. 52-56

15. Кудюкин А.И. Эрозия электродов вакуумных прерывателей [Текст] / А.И. Кудюкин, М.Н. Махмудов, Е.Н. Моос, В.А. Степанов // Труды XXVI Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью». 2019. С. 246-249.

16. Кудюкин А.И. Анализ распыленных частиц с поверхности электродов в межэлектродном производстве вакуумных дугогасительных камер [Текст] / А.И. Кудюкин // Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве. 2020. С. 90-92.

17. Кудюкин А.И. Разрушение поверхности электродов под действием плазменного потока [Текст] / А.И. Кудюкин // Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве. Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. Под редакцией В.А. Степанова, О.В. Кузнецовой. 2021. С. 129-131.

18. Кудюкин А.И. Сравнительный анализ поверхностей разрыва когезионных связей в многослойных системах [Текст] / Н.В. Илясова, О.В. Кондракова, А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2022. Т. 15. № 1. С. 62–69. DOI: 10.18721/JPM.15106.

19. Кудюкин А.И. Сплавные электроды в вакуумно-дуговой плазме [Текст] / А.И. Кудюкин, Е.Н. Моос // Труды Международной Тулиновской конференции ФВЗЧК- 2023. 2023. С. 36.

20. Кудюкин А.И. Разрушение электродов под тепловым воздействием ионного потока [Текст] / А.И. Кудюкин // Труды Международной Тулиновской конференции ФВЗЧК- 2023. 2023. С. 52.

Кудюкин Александр Игоревич

**БЕСШТЕНГЕЛЬНОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ
МОЩНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ
ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕР**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __.__.23. Формат бумаги 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ _____