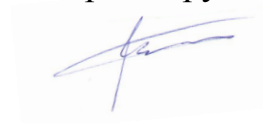


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина»

На правах рукописи



Кудюкин Александр Игоревич

**БЕСШТЕНГЕЛЬНОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ
МОЩНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ВАКУУМНЫХ
ДУГОГАСИТЕЛЬНЫХ КАМЕР**

Специальность 2.2.1. - Вакуумная и плазменная электроника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор В.А. Степанов

Рязань 2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
Развитие вакуумных дугогасительных камер и технология их производства	12
1.1 История развития вакуумных камер.....	12
1.2 Процессы формирования дуги в вакуумных камерах.....	16
1.2.1 Начальная стадия вакуумной дуги в КДВ.....	16
1.2.2 Инициализация вакуумного дугового разряда	18
1.2.3 Особенности возникновения электрической дуги в КДВ	26
1.3 Конструкция КДВ и критерии коммутационного ресурса.....	28
1.3.1 Особенности конструкции контактов.....	29
1.3.2 Применение КДВ на напряжениях 110 кВ и выше	31
1.3.3 Технические требования к камере КДВ-110.....	33
1.4 Технологии, применяемые при производстве металлокерамических дугогасительных камер	41
1.4.1 Удаление газов из внутреннего объема КДВ.....	41
1.4.2 Пайка в водородных печах	47
1.5 Недостатки данной технологии и пути решения.....	48
1.6 Деятельность ООО «Вакуумные технологии». План развития	49
1.7 Постановка цели и задач. Выводы по I главе	51
ГЛАВА II.....	54
Основные требования и этапы производства и совершенствования технологии изготовления высоковольтных сильноточных вакуумных дугогасительных камер.....	54
2.1 Переход производства крупногабаритных КДВ к бесштенгельным технологиям.....	54
2.2 Основные этапы работы.....	55
2.3 Методика контроля вакуума и натекания остаточных газов	63
2.3.1 Рост абсорбционных слоев	63
2.3.2 Методика контроля вакуума и натекания остаточных газов	65
2.3.3 Метод обдувом гелия	68
2.3.4 Метод вакуумной камеры	70
2.3.5 Анализ вакуумной камеры квадрупольной масс-спектрометрической системой	74
2.3.6 Испытание на вакуумную плотность.....	77
2.4 Особенности и обоснование режимов откачки, обезгаживающего отжига и пайки крупногабаритной камеры КДВ-110	78
2.5 Реализация режимов производства на новом современном оборудовании.....	92
2.5.1 Новые режимы пайки.....	92
2.5.2 Отжиг в водородных печах.....	103
2.6 Основные этапы работы на новой высокотемпературной вакуумной печи.....	105

2.7 Процесс откачки на новом оборудовании.....	110
2.8 Выводы по II главе	119
ГЛАВА III.....	122
Деградация электродов КДВ в процессе их эксплуатации и воздействия различных факторов. Повышение надежности приборов	122
3.1 Изучение поверхности контактов КДВ с применением метода атомно-силовой микроскопии	122
3.1.1 Исследование поверхности контактов КДВ	123
3.1.2 Изучение поверхности контактов КДВ до эксплуатационного цикла.....	126
3.1.3 Изучение поверхности контактов КДВ после эксплуатационного цикла	129
3.1.4 Обработка результатов сканирования рельефов поверхности с использованием программного обеспечения «Gwyddion»	131
3.1.5 Обработка результатов сканирования рельефов поверхности электродов КДВ (после эксплуатации) с использованием программного обеспечения «Gwyddion»	137
3.1.6 Обработка результатов сканирования. Анализ хаотического рельефа и шероховатости поверхности.....	141
3.2 Воздействие дугового разряда на поверхность электродов КДВ	153
3.3 Исследование поверхности электродов КДВ электронным микронзондовым анализом ..	156
3.4 Термодинамика химических процессов в зоне взрывного плавления	163
3.5 Рекомендации по совершенствованию поверхности электродов КДВ для увеличения срока службы прибора	171
3.6 Выводы по III главе	174
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	176
Библиографический список.....	183
ПРИЛОЖЕНИЕ А	192
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	194

ВВЕДЕНИЕ

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

КДВ представляют собой камеры, в которых обеспечивается высокий вакуум (давление около 10^{-5} мм рт. ст.). Оболочка камеры выполнена, в основном, 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 часто через штенгель. Сегодня чаще применяется «бесштенгельная» технология откачки, при которой газы удаляются через щели между деталями узла конструкции камеры и корпусом керамической оболочки. После окончания откачки производится пайка узлов камеры и обеспечивается окончательная герметизация изделия. Такая технология с использованием современных вакуумных печей принципиально является более производительной, поскольку позволяет осуществлять «групповой» способ откачки крупногабаритных приборов.

Данное современное высокопроизводительное вакуумное оборудование требует разработки новых режимов пайки (сборки) элементов, узлов и всего прибора крупногабаритных КДВ и внедрения в производство высоковольтной силовых групповой бесштенгельной их откачки, позволяющей повысить производительность и получить конкурентоспособную цену на конечный

продукт.

Контактные материалы (КМ) на электродах КДВ, представляют собой сложные композиции, изготавливаемые методами порошковой металлургии. Основу композиций составляют медь и хром с добавками висмута или сурьмы. Структура и свойства композиций могут существенно изменяться в процессе работы приборов за счет интенсивных термических процессов на поверхности электродов при разрыве больших токов. Долговечность и надежность КДВ определяются, в основном, свойствами контактных материалов. Необходимо изучение динамики морфологии поверхности электродов и состава композиционного контактного материала Cu-Cr (его деградация) и влияние атомов кислорода на эти процессы в условиях интенсивных энергетических потоков. Приведенные факторы показывают, что 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.

Для реализации указанной цели определены следующие **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 деградационных процессов, вызываемых дугой в вакууме, и поиска путей повышения долговечности и надежности приборов.

Научная новизна:

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 °С 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 °С до 3-4 °С), 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 микрозондового 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.

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 °С до (3 – 4) °С 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 44%.

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 °С), 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, исключающего процесс окисления деталей камеры.

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

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.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.2.1. «Вакуумная и плазменная электроника» по следующим пунктам паспорта специальности в части п.4. «Экспериментальные и теоретические исследования различных физических и химических процессов и явлений, происходящих в процессе изготовления и эксплуатации вакуумных и газоразрядных приборов, и создание математических методов оптимизации технологии изготовления таких приборов» и в части п.7. «Исследование характеристик новых или существующих технологических процессов, указанных в п. 4, 5 и создание нового специального оборудования и технологий, обеспечивающих повышение эффективности известных или осуществление новых прогрессивных процессов и производств».

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, геоэкологии 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); Всероссийская научно-методическая 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.

ГЛАВА I

Развитие вакуумных дугогасительных камер и технология их производства

1.1 История развития вакуумных камер

Сегодня трудно себе представить область науки или промышленности, в которой не были бы задействованы достижения вакуумной техники. Вакуумные технологии используются во многих сферах деятельности человека:

радиоэлектроника - вакуумная техника легла в основу разработки приборов нового поколения элементов микро- и нанoeлектроники, существенно увеличив дальность действия и обеспечила надежность и долговечность средств связи и навигации;

металлургия - применение вакуума во время плавки металлов позволяет значительно улучшить физические и механические свойства этих материалов. Создание полупроводников и сверхчистых веществ также невозможно без этих технологий;

химическая промышленность - применение вакуумных сушильных аппаратов позволяет резко увеличить выпуск таких ценнейших материалов, как синтетические волокна, полиамиды, аминопласты, полиэтилен, органические растворители и т.д.;

фармацевтическая и пищевая промышленность - вакуум широко применяется при производстве антибиотиков. Вакуумные кристаллизационные и дистилляционные установки используются для производства сахара, синтетических гормонов, витаминов, лечебных сывороток и получения многих других ценнейших продуктов. Консервирование пищевых продуктов с сохранением их вкусовых и питательных свойств, получение анатомических и бактериологических препаратов осуществляется вымораживанием в вакууме;

легкая промышленность - современные пластмассы, фольга, бумага и ткани во многих случаях получают в вакууме напылением металла.

Металлизированные ткани, в свою очередь, используются для создания вещей с высокой отражательной способностью;

оптическая промышленность - напылением тонких плёнок в вакууме создается высококачественная оптика, фильтры, оптические зеркала.

Сегодня трудно представить такие области науки, как физика твердого тела, плазмы, ядерная физика, исследование космического пространства, электроника без использования в них вакуумной техники и технологий [31].

Первая вакуумная камера, предназначенная для гашения электрической дуги, возникающей между расходящимися контактами коммутационного аппарата, появилась еще в начале XX века. На испытаниях были показаны положительные результаты коммутации токов большой величины, были отключены токи до 10 кА. Это показало перспективность данного направления [1].

Но в те годы у промышленности не было технологических возможностей наладить серийное производство вакуумных металлокерамических дугогасительных камер. Непрерывное совершенствование, как процесса производства, так и самих камер вывели сегодня КДВ на лидирующую позицию в сфере коммутационной аппаратуры напряжением 6–35 кВ, о чем говорят статистические данные по количеству аппаратуры, выпускаемой в мире. Это связано с целым рядом преимуществ вакуума по сравнению с другими средами при гашении электрической дуги. Главное – увеличения отключающей способности при уменьшении габаритных размеров аппаратуры. Использование вакуума является оптимальным решением со стороны безопасности и надежности эксплуатации приборов данного типа.

КДВ по своей конструкции - это металлокерамический контейнер с полостью, в которой создается вакуум порядка $10^{-5} - 10^{-4}$ мм рт.ст. и происходит механические замыкания и размыкания контактов.

В 1926 году профессор Соренсен создал первые образцы КДВ. Однако их применение и, тем более, массовая разработка и производства начались спустя 50 лет. В настоящее время разработка промышленных образцов КДВ и их производство осуществляется рядом фирм США, Германии, Японии и Китая. Разработчиками и изготовителями этих изделий в России являются ВЭИ (г. Москва), «Таврида-Электрик» (г. Москва), «Контакт» (г. Саратов), «Светлана» (г. С.-Петербург), «Вакуумная технология» (г. Рязань). Значительные успехи в развитии теории, конструировании и разработке КДВ связаны с именами Д. Лафферти, М. Шульмана, Г. Финка, Е. Даллини, В.И. Раховского, И.Г. Кесарева, Г.С. Белкина, Ю.Г. Ромочкина, И.А. Лукацкой, С.М. Школьника, А.М. Чалого, Ю.А. Барина, К.К. Забелло, Р.В. Минаковой и др.

Первыми энтузиастами разработки КДВ стали ученые и специалисты Всесоюзного электротехнического института им. В. И. Ленина (ВЭИ г. Москва). Поскольку в основу разработки КДВ заложена технология электровакуумного производства, усилия разработчиков направлялись на серийные заводы Министерства электронной промышленности (МЭП).

Одновременно планировалось и, впоследствии, было организовано серийное производство не только КДВ, но и выключателей в г. Минусинске Министерства электротехнической промышленности (1975 год). Первые серийно произведенные КДВ начал выпускать завод «Полярон» г. Львов (1968 год). После распада Советского Союза и глубокой конверсии военных заказов производство КДВ и вакуумных выключателей стало весьма актуальным. К решению этой задачи были подключены предприятия МЭП:

- НИИ «Исток» г. Фрязино (1991 год);
- Объединение «Электронные приборы» г. Рязань (1992 год);
- Объединение «Контакт» г. Саратов (1994 год).

Основное типоразмерное исполнение касалось КДВ на напряжение 10 кВ.

Производство и разработка вакуумных дугогасительных камер и управляемых вакуумных разрядников на площадке ООО «Вакуумные технологии» в г. Рязань началось в 1999г. при научно-техническом сотрудничестве с ГУП ВЭИ имени Ленина (Москва).

Очень серьезным поставщиком вакуумных выключателей является фирма «Таврида–Электрик» г. Севастополь (Продажа до 40% общей потребности). Однако конструктив КДВ этой фирмы применим только для собственных нужд и в программе импортозамещения их использование невозможно.

Сегодня основные перспективы в совершенствовании КДВ и технологии их производства - это увеличение коммутационного ресурса, снижение массогабаритных параметров. Эти факты ставят перед разработчиками совершенно новые задачи, такие как полное понимание физических процессов, происходящих в КДВ, разработка и проектирование технологических приемов и оборудования, использование новых материалов и тд.

При постоянно увеличивающейся потребности в КДВ, важной задачей становится повышение эффективности производства с параллельным увеличением серийности и расширения номенклатуры: расход материалов и энергозатраты при этом должны снижаться.

Представляются актуальными задачи, решение которых направлено на дальнейшее улучшение эксплуатационных показателей КДВ, совершенствование конструкции и технологии этих изделий, а также повышение эффективности их серийного производства [81].

Предприятие ООО «Вакуумные технологии» (г. Рязань) – единственное предприятие в России, на котором осуществляется серийное производство вакуумных металлокерамических высоковольтных дугогасительных камер с напряжением 4÷110 кВ, по качеству, параметрам и надежности не уступающих лучшим зарубежным аналогам. Поэтому только предприятие ООО «Вакуумные технологии» (г. Рязань) реально обладает возможностью решить задачу

импортозамещения вакуумных дугогасительных камер после расширения материально-технической базы и объемов производства под реальные заказы предприятий Росэнерго до 2020 и последующие годы.

Перед тем как перейти к подробному описанию конструкции и особенностей КДВ, рассмотрим, как формируется дуга в вакууме, какие условия для этого необходимы и как можно наиболее эффективно погасить такую дугу.

1.2 Процессы формирования дуги в вакуумных камерах

1.2.1 Начальная стадия вакуумной дуги в КДВ

Для большинства металлов в начальной стадии отключения КДВ наблюдается дуга, при которой не происходит движение катодного пятна по поверхности электродов второго вида [52]. Непосредственно после взрыва металлического «мостика» между электродами возникает дуга и происходит расширение канала тока дуги (скорость $\sim 5 \cdot 10^5$ см/сек). Время существования данного процесса не более 10-15 мксек; число каналов увеличивается с ростом тока; на вольфрамовых электродах по одному каналу приходится ток в 200 - 500 А, (в 2 раза больше, что в дуге с движущимися катодными пятнами [53]); между неподвижными каналами тока происходит систематическое перераспределение тока (постепенно или скачком), что сопровождается взрывом и мгновенным испарением на катоде с разбрызгиванием материала катода; частота взрывов возрастает с ростом тока; свечение возникает как у катода, так и у анода; после многократного воздействия вакуумной дуги на электроды, один из них (катод) покрывается многочисленными кратерами, второй же (анод) имеет оплавленную поверхность.

Напряжение на дуге имеет наименьшее значение в начальный момент образования дуги, далее, по мере расхождения электродов, оно возрастает. Рост напряжения происходит ступенчато, особенно на ранних стадиях

существования дуги. При этом происходит начало движение катодных пятен по поверхности электрода, после чего напряжение на дуге с течением времени практически не изменяется, несмотря на продолжающееся расхождение электродов.

Рост напряжения коррелируется с взрывами. Микровзрыву на поверхности в большинстве случаев предшествует подъем напряжения. В момент взрыва рост напряжения замедляется, прекращается или происходит его спад на несколько вольт в зависимости от интенсивности взрыва.

На всех исследуемых металлах [52] наблюдается увеличение времени существования дуги с ростом тока. Оно увеличивается также при уменьшении диаметра электродов.

Отличия в особенностях развития начальной стадии отключения дуги на разных металлах заключаются в следующем:

1. каналы тока и катодные пятна практически неподвижны;
2. напряжение на дуге в момент ее образования заметно меньше, чем в дуге с движущимися катодными пятнами, и по мере расхождения электродов возрастает;
3. имеют место взрывы на электродах с выбросом капель металла.

От материала электродов зависит характер перехода дуги от одного вида (с неподвижным катодным пятном) к другому (с подвижным катодным пятном). На электродах из Cu, Ni, Sn этот переход происходит более плавно, чем на остальных металлах. Плавному переходу соответствует промежуточная стадия дуги, при которой одновременно существуют неподвижные и движущиеся катодные пятна.

Согласно представлениям, развитым Кесаевым [45], высокая подвижность катодных пятен вакуумных дуг первого вида в значительной степени обусловлена асимметрией собственного магнитного поля вокруг них. Там, где напряженность магнитного поля выше, диффузионные потери

электронов и ионов меньше и, следовательно, больше плотность ионного тока к катоду. Это способствует систематическому смещению катодных пятен в область большего магнитного поля, следствием чего является непрекращающееся хаотическое движение катодных пятен. При более высоких давлениях окружающей среды, при которых свободный пробег электронов и ионов становится меньше радиуса Лармора, влияние магнитного поля на диффузию заряженных частиц уменьшается. Это должно привести к замедлению или прекращению движения катодных пятен, что и наблюдается в случае металлических дуг, горящих при давлениях порядка атмосферного и более высоких [82]. Таким образом, прекращение движения катодных пятен может произойти из-за увеличения давления окружающей среды. Следует указать, что в случае тугоплавких электродов фиксации катодных пятен может способствовать, по-видимому, и термоэлектронная эмиссия катода.

Может ли сближение электродов вызвать значительное увеличение плотности пара в области существования дуги не известно.

Свечение вакуумной дуги имеет вид конуса с вершиной на катоде. По-видимому, такой же профиль имеет и область прохождения тока, т.е. плотность тока у катода значительно превосходит плотность тока у анода. Последнее подтверждается тем фактом, что большая часть энергии дуги рассеивается на аноде, а эрозии подвержен главным образом катод [99]. При конусной конфигурации линий тока сближение электродов приводит к увеличению температуры анода и может привести к его испарению.

1.2.2 Инициализация вакуумного дугового разряда

Как известно, вакуум - это диэлектрическая среда (в нем отсутствуют частицы, носители заряда). Вакуум же обладает уникальными свойствами: при давлении $7,5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. электрическая прочность способна достичь пикового напряжения в 200 кВ (на расстоянии порядка 12 мм между

электродами). Однако, получение и сохранение вакуума очень трудоемко и затратно и всегда есть предел электрической прочности.

Электрический пробой вакуумной среды может быть обусловлен автоэлектронной эмиссией (АЭЭ). Критическая напряженность полей при АЭЭ составляет $10^7 - 10^8$ В/см. Практически АЭЭ удается возбудить при гораздо более низких напряжениях из-за коэффициента формы реального рельефа поверхности, например, наличием микроострия с радиусом вершины $10^{-6} - 10^{-8}$ м). Поэтому АЭЭ возможно уже при напряжениях на электродах в сотни вольт. Электрическая прочность в вакууме при АЭЭ практически не зависит от давления остаточного газа, а связана только с материалом и формой электродов (шероховатостью поверхности) и межэлектродным расстоянием. АЭЭ в дугогасительных камерах может переходить во взрывную эмиссию [57]. Эмиссия электронов возникает при сообщении электронам дополнительной энергия (от внешнего источника) или созданы условия для их туннелирования. В обзоре Г.А. Месяца «Эктон – лавина электронов из металла» предложено объяснение возникновения пакетов электронов (кратковременных лавин), реализующих условия подобной эмиссии. При этом происходят микровзрывы на поверхности катода (причиной служит концентрирование высокой удельная энергия электрического поля) и сильного перегрева металла. Мы предполагаем, что в нашем приборе происходят сходные процессы.

Взрывной электронной эмиссией (ВЭЭ) - это испускание электронного тока из поверхности проводника, являющегося катодом, вследствие взрыва микроскопического объема на его поверхности. Взрыв микрообъема металла и возбуждение ВЭЭ может происходить по различным причинам: при ударе о катод кусочка вещества, ускоренного до большой скорости, воздействии на катод мощного импульса лазерного излучения или пучка заряженных или нейтральных частиц и т.д.

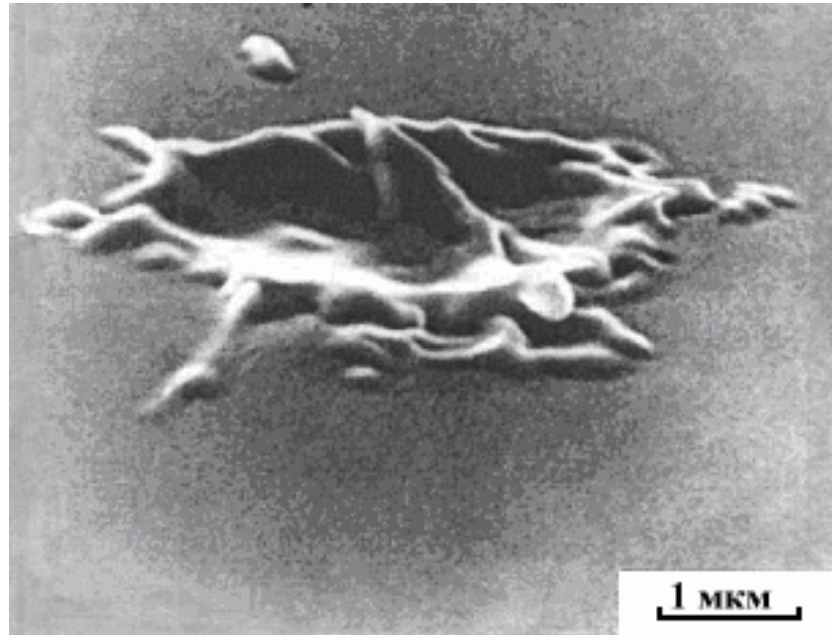


Рис. 1.1. Процесс разбрызгивания материала поверхностных слоев [57]

Один из наиболее распространенных способов возбуждения ВЭЭ - быстрый нагрев микроучастков катода электрическим током большой плотности (что мы можем наблюдать в дугогасительных камерах при возникновении дуги).

Токи большой плотности провоцируют нагрев и испарение поверхностных слоев электрода. Момент времени от взрыва микроострия (дефекта поверхности) до завершения роста тока - искровая стадия пробоя. По завершению этой стадии наступает дуговая стадия разряда, характеризующаяся высокой проводимостью заполненного плазмой промежутка. Время дуговой стадии зависит от тока, обеспечивающего горения дугового разряда.

В ходе взаимодействия плазмы с поверхностными слоями катода непрерывно обеспечиваются условия для возникновения и поддержания ВЭЭ. Как было сказано, при ВЭЭ происходит разрушение микровыступов. При взрыве микроострия вокруг образуется область расплавленного металла. Силы поверхностного натяжения жидкого металла и переданная кинетическая

энергия растекаемым массам вещества разделяют расплавленную область на отдельные струйки жидкого металла.

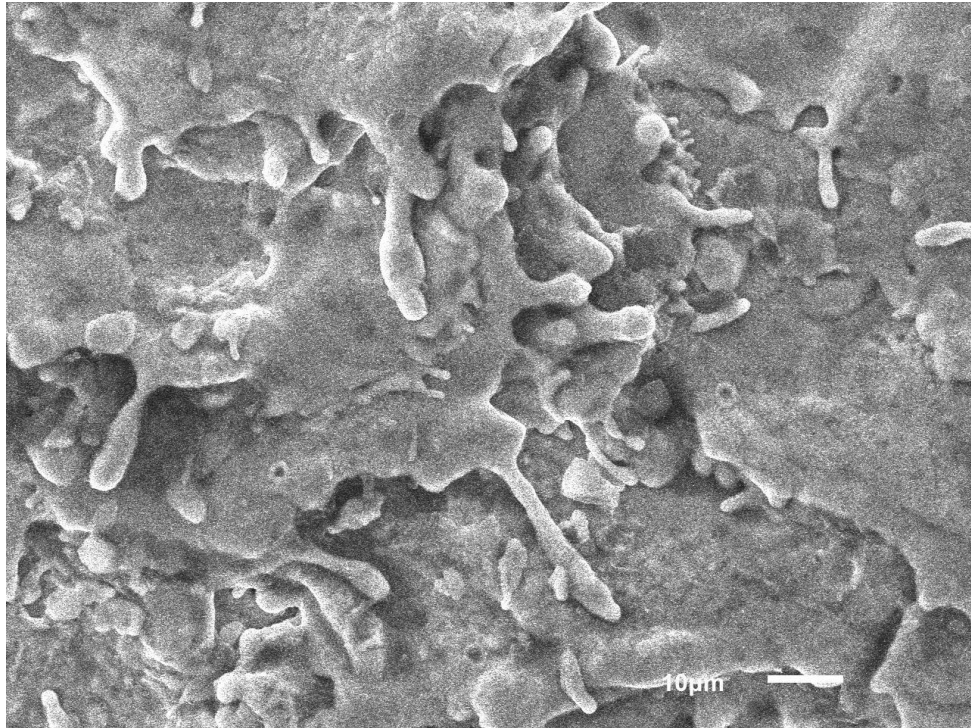


Рис. 1.2. Микрофотография области плавления

Они вытягиваются вдоль поверхности катода, зачастую, от них так же отрываются отдельные капли. Некоторые капли могут оторваться от поверхности и улететь в межэлектродный промежуток. Расплавленные участки поверхности в дальнейшем застывают из-за отвода тепла в объем электрода. Эти явления отражают нестационарный механизма ВЭЭ.

На месте микроострия появляется кратер, образующийся в результате вытеснения металла. Ранее было показано, что расплавленный металл вытеснялся неравномерно, видны области наплыва материала.

Работы по исследованию механизмов ВЭЭ проводились Г.А. Месяцем начиная с 60-х годов. Уже скоро эти исследования дали результат - было установлено, что в результате взрыва микроострий на катоде под действием

тока автоэлектронной эмиссии (АЭЭ - один из способов возбуждения ВЭЭ) появляется ток электронов, который на порядки превосходит начальный ток.

В ходе исследований авторами были сделаны ряд выводов: "Поверхность катода не идеальна, а обладает шероховатостью, выступы на катоде являются источниками АЭЭ из-за локального усиления поля на них; ... появление на катоде отдельных ярких пятен можно связать со взрывом выступов; ... свечение на аноде связано с процессами под воздействием электронного пучка, который вытягивается из плазмы, образуемой из паров катодного материала". Так в 1966 году были описаны явления, которые сейчас получили название ВЭЭ.

Дуговой разряд относится к самостоятельным разрядам. Возможность образования дугового разряда также определяется плотностью тока (сотни и тысячи А/мм²) и окружающим давлением.

Для возбуждения электрической дуги в межэлектродном пространстве вакуумных прерывателей необходимо сначала сомкнуть, а затем развести электроды на некоторое расстояние. Из-за неровности поверхности на микроуровне (рисунок 1.3), возникают всего несколько точек контакта (выступы и наиболее высокие пики неровностей) поверхностей электродов, при этом происходит увеличение сопротивления и рост количество выделяющегося «джоулевого» тепла, что приводит к критическому увеличению температуры на участках электродной поверхности.

Поверхность катода имеет микронеровности, возникающие вследствие механической обработки (происходит разрушение зерен кристаллической структуры металла и образуется аморфный слой). Часто электрод после этого подвергается электрической полировке. При такой полировке происходит растворение большинства выступающих частей. Существование остаточных выступов доказано прямыми наблюдениями в электронном микроскопе в конце 80-х годов.

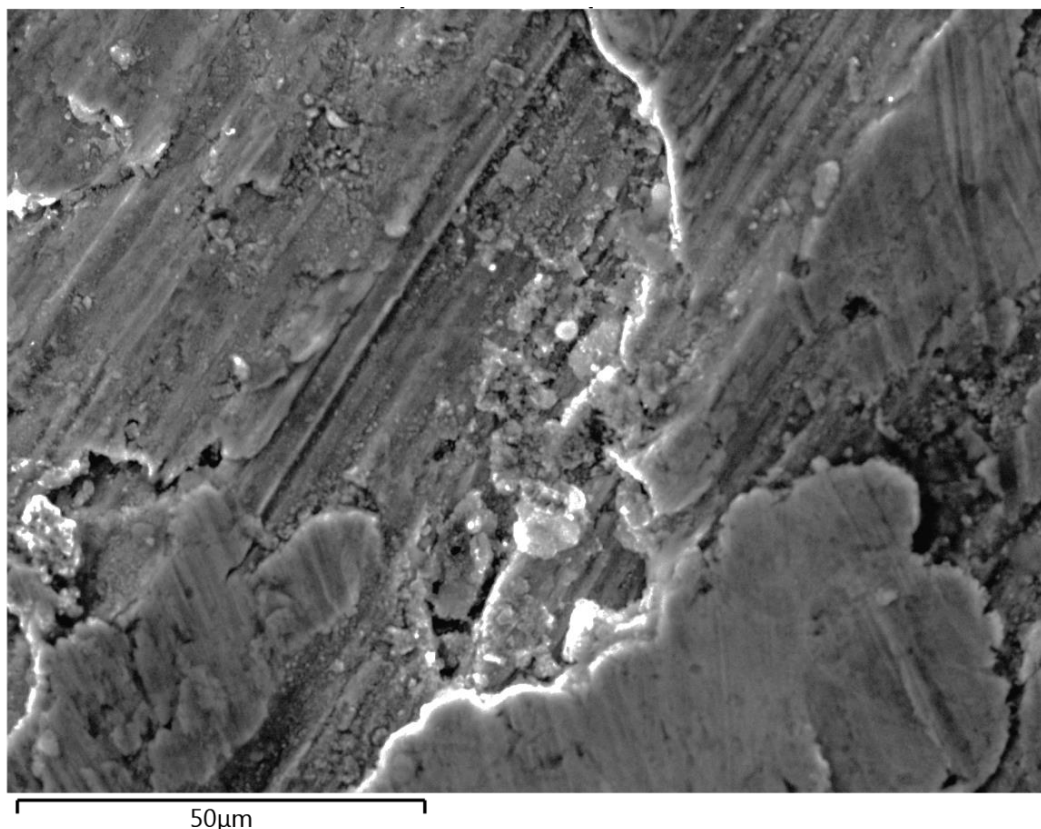


Рис.1.3. Микрофотография визуально гладкой поверхности электрода

Значительные изменения микрорельефа поверхности металла происходят при его нагреве. При этом уменьшается поверхностная энергия металла за счет выхода граней кристаллов с меньшим поверхностным натяжением. В нашем случае, такое явление наблюдалось с атомами хрома. Появлению микронеровностей на электродах также способствуют плавление, испарение, фазовые превращения и т.д.

Последующее быстрое охлаждение нагретых участков металла приводит к возникновению на поверхности выступов. Длительные воздействия существенно искажают микрорельеф. Могут происходить такие процессы, как поверхностная диффузия, перестройка в электрическом поле, испарение, миграция загрязнений и т.д.

Для определения и уточнения количественных характеристик поверхности было введено понятие коэффициента усиления электрического

поля (β_E) - определяемым как отношение локального значения (истинного) напряженности электрического поля на краю (E) к среднему значению E_0 :

$$\beta_E = E/E_0 = EL/U, \quad (1.1)$$

где U — приложенное напряжение питания, L — межэлектродное расстояние.

Одним из методов определения коэффициента усиления является измерение зависимости автоэлектронного тока от напряженности электрического поля (ток при этом описывается уравнением Фаулера - Нордгейма):

$$i = aF^2 \exp \frac{-b\varphi^{3/2}}{F}, \quad (1.2)$$

где i — плотность тока эмиссии, F — напряжённость электрического поля, φ — работа выхода, функции a и b зависят от геометрии и работы выхода.

В конце 70-х годов центры эмиссии при таких процессах определяли методом зондирующего анодного отверстия и проводили обследования рентгеновским микроанализатором, также регистрировали энергетический спектр эмитируемых электродов. Центры, обнаруженные на границах зерен кристаллической решетки, имели спектр электронов с максимумом, смещенным в сторону низких энергий, что характерно для полупроводниковых эмиттеров.

Из проведенных исследований и анализов стало понятно, что коэффициент усиления может изменяться в широких пределах (от 10 до 10^3). Многие исследователи считали, что 10^3 - слишком большие значения. Но такие коэффициенты наблюдаются и фиксируются. Есть несколько источников неверной оценки β_E :

- 1) влияние размерных эффектов;
- 2) уравнение Фаулера - Нордгейма нуждается в принципиальном уточнении, когда его применяют для очень тонких микроострий;
- 3) на параметр β_E огромное влияние оказывают адсорбированный газ и диэлектрические пленки.

Проще говоря, повышение температуры отдельных участков электродов связано с увеличением кинетической энергии частиц материала (чаще всего, свободных электронов). При достижении высоких температур, энергия части электронов достигает значений, при которых они способны преодолеть потенциальный энергетический барьер и покинуть поверхность электрод – возникновение и протекании термоэлектронной эмиссии. Испущенные разогретым катодом развитые электроны вылетают из поверхностных слоев и, ионизируя газ, образуют плазму.

В большинстве приборов, использующих и инициализирующих дуговой разряд, линейные размеры электродов и разрядного промежутка стараются подбирать одинаковых или близких размеров, что способствует снижению развития и уменьшению времени жизни плазменного столба. Поэтому принимается, что дуга развивается и существует благодаря двум факторам: поверхностным слоям электрода и плазмы в межэлектродном пространстве.

Дуга в вакууме имеет одно кардинальное отличие от дуг, развивающихся при высоком давлении - эта дуга горит в парах металла (испарившихся элементах электрода). В момент размыкания контактов КДВ, происходит разрушение поверхностного слоя металлических электродов (с образованием облака паров металлов) из-за высокой концентрации токов в области одного из ранее рассмотренных дефектов поверхности электрода. Данный процесс создает первичную среду горения дуга. Процесс горения поддерживается новыми поступающими парами металлов в межэлектродное пространство. Это

еще одна важна особенность вакуумной дуги - самовоспроизведение среды, в которой протекает горение.

Зачастую, дуга в вакууме между двумя электродами представляет собой некоторое количество параллельных дуг (в зависимости от материала по такой дуге проходят токи от единиц до сотен ампер). На конце каждой дуги на отрицательном электроде образуются катодные пятна (небольшие сильно разогретые области). Непрерывное хаотичное движение катодных пятен по поверхности давно наблюдается исследователями. Уже рассчитана скорость этого перемещения, она достигает 10 м/с.

Вблизи катодных пятен располагается зона повышенного давления паров металлов. Это следствие большой плотности тока области катодного пятна. В такой области и происходит наиболее интенсивный процесс ионизация паров, которые в дальнейшем образуют плазменную дугу, стремящуюся в направлении анода. Скорость образования и движения дуги зависит от материала электрода. В медных электродах, к примеру, скорость потоков плазмы может достигать 10^6 см/с. Количество испаряемого материала так же зависит от элементного состава электрода (для меди - 80 мкг/Кл).

Эрозионные процессы на поверхности электродов в вакуумной дуге достаточно велики. Катод, относительно анода, эродирует в большей степени из-за наличия на своей поверхности катодных пятен.

1.2.3 Особенности возникновения электрической дуги в КДВ

Природа горения дуги очень сложная. Чтобы запустить этот процесс нужно создать определенные условия. В КДВ горение дуги описывается явлением автоэлектронной эмиссии: процесс подразумевает собой выделение электронов с поверхности контактов при условии сильного электрического поля.

Когда возникает авария на линии электропередач (короткое замыкание или обрыв линии) происходит размыкание контактов по обратному сигналу релейной защиты. В этот момент в вакуумном промежутке электродов остаются «нити» (из-за шероховатости поверхности), которые плавятся под воздействием больших токов. Такое явление сопровождается высокой температурой, что приводит к испарению металла с поверхности (Рис.1.4).

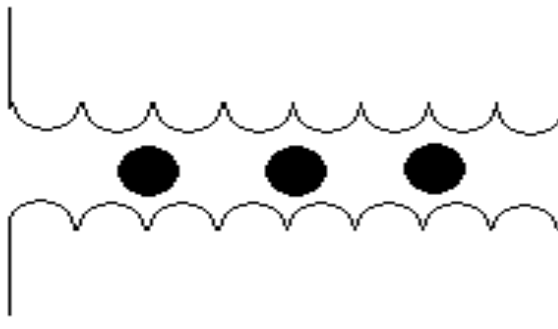


Рис.1.4. Образование паров металла

Появившиеся пары металла бомбардируются электронами, вышедшими на поверхность электрода, за счет автоэлектронной эмиссии и происходит ионизация паров, появляется дуга между контактами, называемая вакуумной дугой. Она горит до тех пор, пока есть условия для образования паров металлов.

Когда работа размыкания электродов происходит быстро, то процесс ионизации паров прекращается быстрее (нити из металлов отсутствуют) и дуга гаснет за 10 - 20 мс.

Главным недостатком вакуумных выключателей является возможность генерирования перенапряжений в электрической сети. Причиной этого служит повторный пробой промежутка между электродами и образуется эскалация напряжения.

В вакуумном выключателе существует возможность холодной сварки - прилипание контактов друг к другу при долгом замкнутом состоянии. Такую проблему производители решают введением примеси в составе материала контактов.

Для снижения величины срезаемого тока в составе материала контактов добавляют примесь сурьмы от 2 - 5%.

В качестве контактных материалов в КДВ используются медно-висмутовые, медно-хромовые и медно-бериллиевые сплавы.

1.3 Конструкция КДВ и критерии коммутационного ресурса

КДВ конструктивно выполнена в виде слоеного керамического цилиндра, внутри которого размещена контактная и экранные системы, токопроводящих элементов, обеспечивающих высоковольтность, электрическую прочность, коммутационные и ресурсные характеристики [13].

Критерием коммутационного ресурса является наибольший допустимый износ контактов (этот фактор разберем в дальнейшем), при которых еще сохраняется работоспособность КДВ [51]. Износ контактов зависит от свойств вакуумной дуги: материала электродов; скорости подъема (изменения) напряжения (хода движения контактов); конфигурации и размеров контактных систем; степени обезгаживания (элементов, всего прибора); чистоты поверхности деталей (узлов), подверженных пайке; конфигурации камеры разрядного промежутка и др. Основные технические характеристики вакуумных камер представлены в таблице 1.1.

Для нормальной работы КДВ в их полости необходимо создать и поддерживать определенный ($\sim 7,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.) вакуум. Высокие требования к разрежению в современных КДВ связаны с большими напряженностями электрических полей внутри прибора и влиянием остаточных газов и их ионов на работу приборов.

В процессе откачки и обезгаживания металлокерамических КДВ необходимо не только получить заданное разрежение в приборе, но и создать условия, исключающие повышение давления выше допустимого при его эксплуатации и хранении.

Таблица 1.1.

Технические характеристики камер

Тип камер	КДВ-10	КДВ-35	КДВ-110
Номинальное напряжение, кВ	10	35	110
Номинальный ток, А	1000	1600	3150
Номинальный ток отключения, кА	20	25	40
Ход контактов, мм	6	16,5	70
Электрическое сопротивление, мкОм	50	30	30
Габаритные размеры (внешний диаметр x высота), мм	76x200	125x408	250x1200

1.3.1 Особенности конструкции контактов

Для повышения отключающей способности КДВ используются нормы, которые создают постоянное перемещение дуги под воздействием магнитного поля, образуемого отключаемым током. В вакуумных выключателях часто используются контакты с поперечным по отношению к дуге магнитным полем. Для высоких напряжений и токов до 100 кА используются контакты с продольным магнитным полем. Большое распространение получили два вида контактов:

1. Контактная система типа «спиральный лепесток», которая заставляет постоянно вращаться по поверхности контактов сжатую дугу, что блокирует перегрев отдельных зон и распределяет тепло по всей поверхности.

Эффективность вращения дуги зависит от кривизны спирали. Чем больше кривизна, тем лучше показатель эффективности гашения дуги (Рис.1.5).

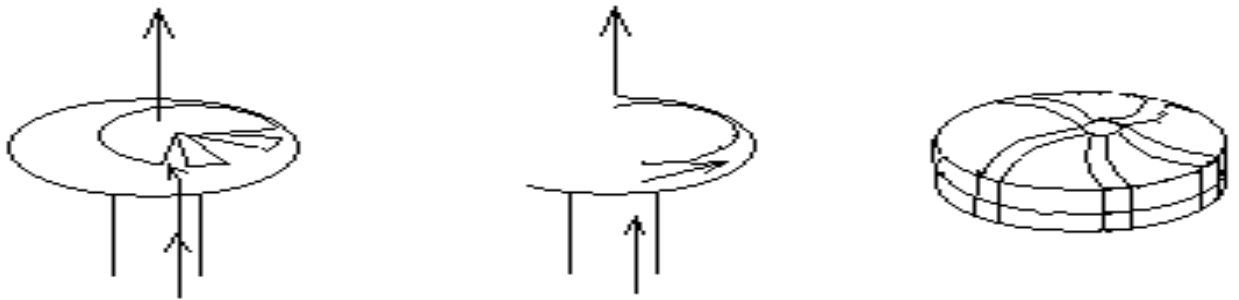


Рис.1.5. Конструкция контакта в виде формы «лепесток»

Такая конструкция контактов изменяет направление тока на 90 градусов. За счет этого получается постоянное вращение дуги по поверхности электрода.

В межконтактном промежутке КДВ в соотношении от конструкции и величины тока дуги в вакууме может существовать в диффузной форме при токах 5-7 кА или сжатой форме при высоких токах. Диффузная дуга образуется в виде нескольких параллельных дуг, через каждую из которых может протекать ток до нескольких сотен ампер.

2. Контакты чашеобразного типа, препятствует образованию сжатой локализованной дуги, которая остается в диффузном состоянии, что облегчает процесс дугогашения (Рис.1.6).



Рис.1.6. Изображение контакта чашеобразного типа

1.3.2 Применение КДВ на напряжениях 110 кВ и выше

Из-за формы дуги в вакууме на высоком напряжении ее гашение затрудняется при переходе нуля. Ещё одна проблема - нелинейная зависимость напряжения пробоя от пространства между контактами. Одно решение этой проблемы - несколько последовательных разрывов.

В 2002 году компанией AE Power System Corporation разработана КДВ, в конструкцию которой внесли улучшения внешнего вида. Номинальное напряжение этой камеры составило 145кВ, с 40кА током замыкания и номинальным током в 2кА. Используемый с этой целью прерыватель представлен в виде отдельного вакуумного прерывателя с одинарным разрывом, где используются медь-хромные защитные электроды осевой напряженности магнитного поля [22].

Первый высоковольтный выключатель на 126кВ/40кА/2кА с одинарным разрывом создан в 2003 году. Диаметр прерывателя - 100 мм, а зазор между контактами – 60 мм. В этой камере использованы электроды осевого

магнитного поля, что позволило улучшить работу прибора, используя один разрыв.

У вакуума же есть свои преимущества, отличающие его от элегаза. Одним из преимуществ вакуумных выключателей является легкость производства оборудования и малое количество компонентов, что непременно приводит к продлению срока службы. Так же, это приводит к уменьшению габаритно-весовых параметров.

Широкое развитие получило объединенные цепи из КДВ и сверхпроводимых материалов. Этой проблемой занимается целый ряд лабораторий и научных центров. Выяснение принципов работы этих устройств поможет создать новые способы подключения элементов со сверхпроводимостью параллельно цепи мощного источника энергии.

В России КДВ на 110 кВ и выше разрабатываются и внедряются на уровне японских предприятий, что на несколько шагов опережает европейских коллег.

Одним из первых российских вакуумных выключателей на 110 кВ был образец, разработанный на ОАО «НПП «Контакт» (Саратов, 2007г). Технические требования на коммутационный аппарат согласованы с ФСК ЕЭС. В 2009 г. на предприятии изготовлен опытный образец двухразрывного вакуумного выключателя на базе камер КДВА-60-31,5/2000 с пружинно-магнитным приводом [22].

Отечественные ученые и инженеры постоянно совершенствуют КДВ и технологии их производства, применение которых способствует развитию и модернизации распределительных устройств на 110 кВ и выше и позволяет обеспечить:

- высокую экологическую безопасность;
- уменьшение габаритных параметров;
- сокращение эксплуатационных расходов;

- удобство технического обслуживания и ремонта.

1.3.3 Технические требования к камере КДВ-110

Создание прибора и реализация научного задела на НИР КДВ-110 связана с необходимостью разработки вакуумных высоковольтных выключателей (коммутационного аппарата) и развитием в России высоковольтной электротехники.

Внедрение в сферу производства вакуумных дугогасительных камер на напряжение 110 кВ и выше возможно, как показано в разделе 1.1, только на предприятии ООО «Вакуумные технологии», которое после выполнения проекта «Разработка конструкции и высокопроизводительного технологического процесса на основе бесштенгельной откачки вакуумных дугогасительных камер – элементной базы для современного конкурентоспособного коммутационного оборудования, включая программу импортозамещения» (Системный номер 2013-12-27-19598) на базе вакуумной печи «Schment» реализована групповая технология бесштенгельной откачки при производстве крупногабаритных высоковольтных КДВ. Особенностью этих КДВ является их большой размер. Так, наружный диаметр корпуса КДВ на 110 кВ достигает 200 - 250 мм, а его высота 800 - 1200 мм. Внутренний объем такой КДВ составляет 25 л. В то время как КДВ в классе напряжений 10 кВ имеет внутренний объем 0,5 - 2 л.

Изначально изготовление КДВ на напряжение 110 кВ на ОАО и НАО «Контакт» осуществляется с применением способа штенгельной откачки через медную откачную трубку (штенгель).

На рис. 1.7 показано отверстие для установки штенгельной трубки.

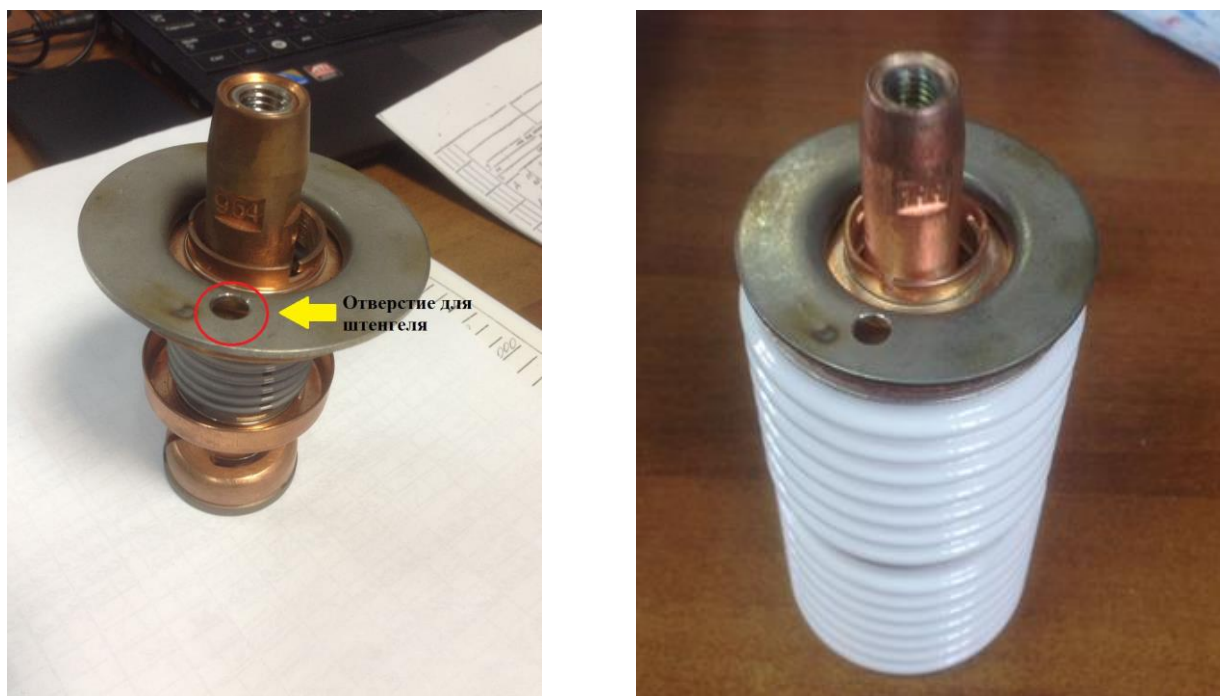


Рис. 1.7. Токовывод штенгельной камеры и штенгельная камера

Сборка штенгельной камеры достаточно трудоёмкая. Основной задачей при этом является установка штенгеля, по средствам которого будет осуществляться откачка вакуума. Самая длительная часть операции - это откачка вакуума, большая часть времени затрачивается именно на нее, что влияет на низкую производительность. На рис. 1.9 показан чертеж камеры, использующей штенгельную откачку при производстве.

Вакуумная дугогасительная камера изготавливается с использованием припоя, при температуре до 900 °С в условиях высокого вакуума. Кольца токовыводов к керамике паяют при температуре 850 °С в вакууме, позволяя обеспечить герметичность корпуса и камеры в целом.

Основной недостаток этого способа - это высокая температура на второй ступени пайки, которая приводит к расплавлению и выпадению из углублений деталей легкоплавкого материала.

Недостаток данного способа - низкая производительность, которая обусловлена необходимостью сварки токовыводов к корпусу, проведением

дегазации, откачки камеры и ее герметизации на дорогостоящем специальном технологическом оборудовании.



Рис. 1.8. Установка штенгельной камеры на откачку

На рисунке 1.9 представлен пример конструкции выключателя с номинальным напряжением 10 кВ (ток 1000 А). Электромагнитный привод способен переключаться между двумя положениями: вкл и выкл.

Фиксация якоря в этих положениях производится без применения механических защелок, и обеспечивается:

- силой упругости отключающей пружины в положении ОТКЛЮЧЕНО;
- силой, создаваемой остаточным магнитным потоком кольцевого постоянного магнита, в положении ВКЛЮЧЕНО [22].

Процесс включения и отключения производится управляющими импульсами, которые подаются на электромагнитный привод.

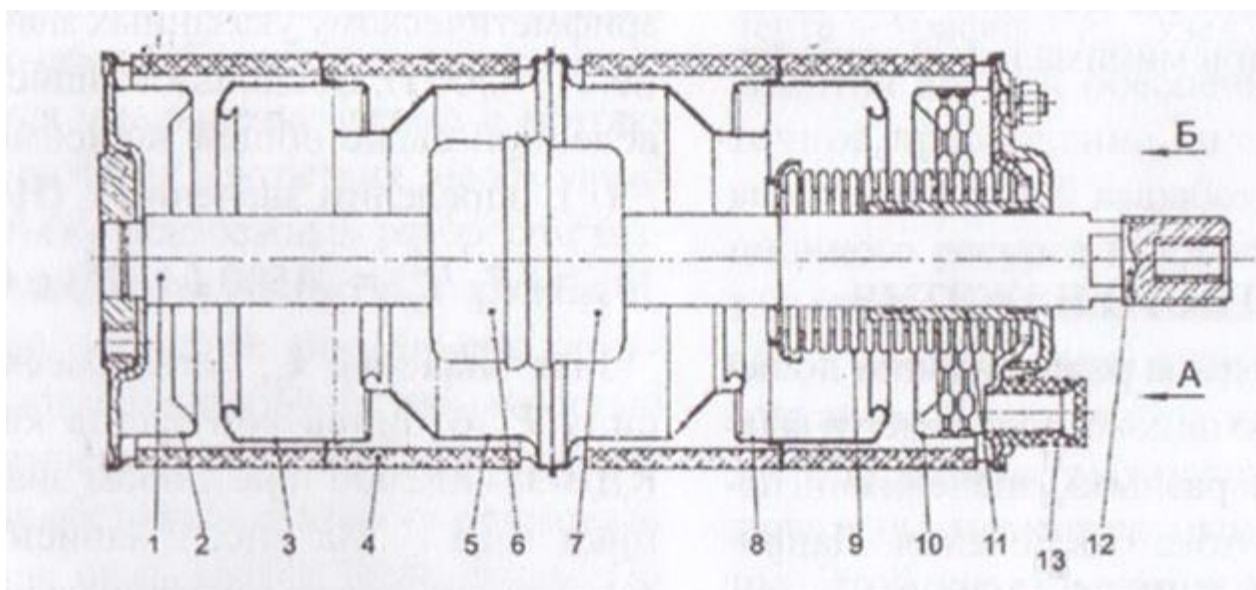


Рис. 1.9. Схематичный разрез камеры: 1,12 – токоподводы; 2, 3,5,8, 10 – экраны, находящиеся под плавающим потенциалом; 4 – корпус; 6,7 –контакты; 9 – сильфон; 11 – направляющая; 13 – штенгель для откачки прибора

В момент размыкания контактов коммутируемый ток порождает разряд, именуемый «дугой в вакууме». Эта дуга существует за счет испаряющегося с поверхности контактов металла. Проводником тока в этой ситуации служит плазма, образованная парами металла. Как только ток достигает нуля, дуга гаснет, а пары металла конденсируются за 7-10 микросекунды на все поверхности, находящиеся внутри дугогасительной камеры. Но может возникнуть ситуация, когда образуются перегретые участки на контактах, которые могут послужить источниками эмиссии заряженных частиц. Для предотвращения подобного явления служит такой процесс как управление вакуумной дугой. Зачастую, этот процесс осуществляется при помощи магнитного поля, порождаемого самим током.

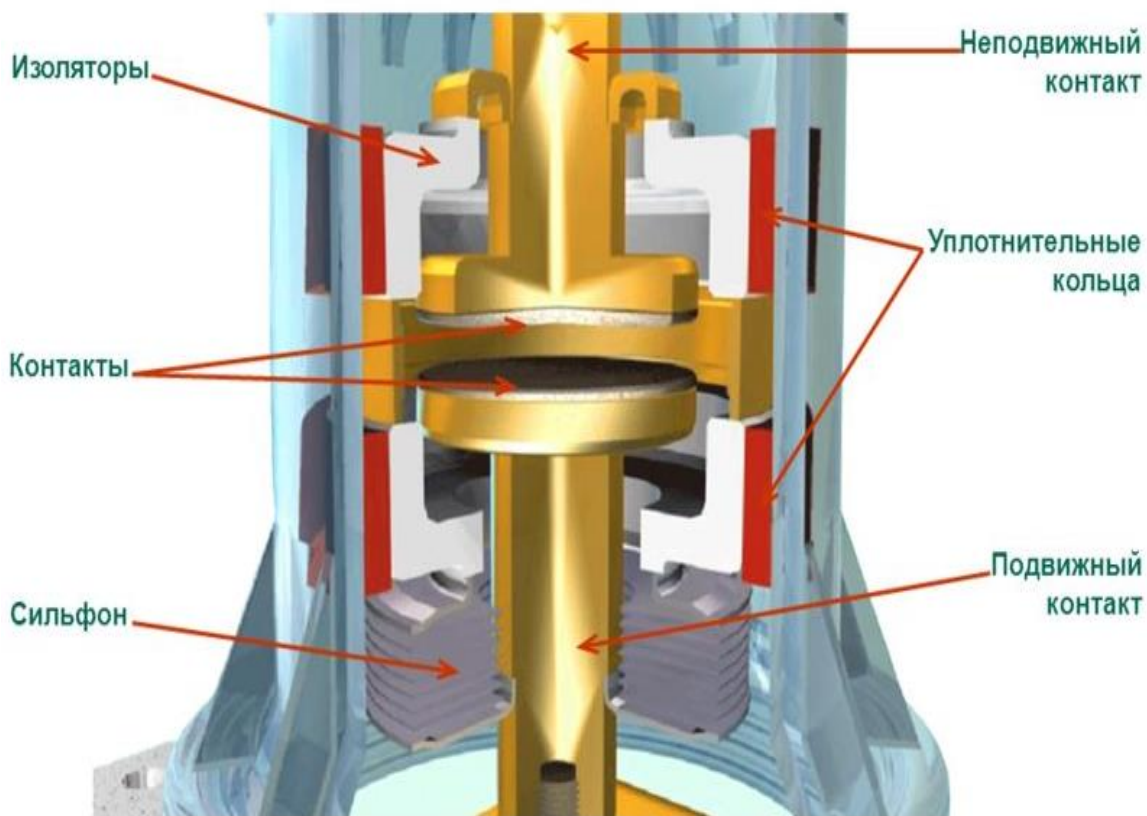


Рис. 1.10. Внутреннее устройство КДВ

Вакуумные дугогасительные камеры выполняются в металлокерамическом исполнении с использованием унифицированных режимов группового вакуумирования.

Для всего класса высоковольтных вакуумных изделий предприятия определены и унифицированы технологии контроля качества: остаточный вакуум, электропрочность, электрическое сопротивление.

Вакуумные дугогасительные камеры на номинальное напряжение 110 кВ (КДВ-110) предназначены для работы в составе вакуумных выключателей с одним разрывом в полюсе наружной установки, отвечающим требованиям ГОСТ 55265 и ГОСТ 1516.3.

Основные параметры:

1. Номинальное напряжение 110 кВ.

2. Номинальный ток 2500-3150 А

3. Номинальный ток отключения 31,5-40 кА (требование проверяется в составе выключателя)

4. Коммутационная способность.

4.1. Коммутационная способность камеры при коротких замыканиях в составе выключателя на номинальное напряжение 110 кВ должна соответствовать требованиям ГОСТ Р 52565 со следующими уточнениями:

- минимальная бестоковая пауза – 0,3 с;
- время дуги – не более 0,025 с;
- процентное содержание аperiodической составляющей номинального тока отключения при коротких замыканиях, отнесенное к моменту прекращения соприкосновения контактов, не более 50%.

4.2. Число циклов оперирования ВО, определяющее ресурс по коммутационной стойкости камеры при номинальном токе в составе выключателя на номинальное напряжение 110 кВ должно быть не менее 5000 циклов ВО (с произвольной паузой).

4.3. Число операций О, определяющее ресурс по коммутационной стойкости камеры при коротких замыканиях в составе выключателя на номинальное напряжение 110 кВ должно быть не менее 25 при номинальном токе отключения.

4.4. Камеры в составе выключателя должны выдерживать включение на ток короткого замыкания с амплитудой, равной $2,55 I_{о\text{ ном.}}$, где $I_{о\text{ ном.}}$ – номинальный ток отключения

5. Электрическая прочность.

5.1. Изоляция камер в составе выключателя на номинальное напряжение 110 кВ, не бывшего в эксплуатации, при нормальных климатических условиях по ГОСТ 15150 должна выдерживать одноминутное испытательное напряжение частотой 50 Гц - 230 кВ.

5.2. Изоляция камер в составе выключателя на номинальное напряжение 110 кВ, не бывших в эксплуатации, при нормальных климатических условиях по ГОСТ 15150 должна выдерживать испытательное напряжение полного грозового импульса – 550 кВ.

5.3. Электрическое сопротивление камеры постоянному току при дополнительном контактном нажатии 4000 (+600) Н должно быть не более 30 мкОм.

6. Камеры в составе выключателя на номинальное напряжение 110 кВ должны быть стойкими к сквозным токам короткого замыкания вплоть до следующих значений:

- а) наибольшего пика тока электродинамической стойкости 80 кА;
- б) тока термической стойкости – 31,5 кА;
- в) времени протекания тока термической стойкости – 3 с.

7. Ход контактов КДВ-110 – 60 -70 мм.

8. Давление остаточного газа внутри камеры – не выше $7,5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. в течение всего срока службы.

9. Наибольшая допустимая температура нагрева на выводах камеры в составе выключателя (при обязательном наличии серебряного покрытия, как на контактных поверхностях выводов камеры, так и на контактных поверхностях внешних проводников) при номинальном токе должна быть не более 120 °С при эффективной температуре окружающей среды 40 °С.

10. Габаритные размеры КДВ-110:

- наружный диаметр 200 - 250 мм;
- длина корпуса 800 - 1200 мм.

Требования надежности:

1. Ресурс – не менее 10 000 операций «включено – пауза (не менее 0,3 с) – отключено».

2. Срок службы – не менее 30 лет.

Требования к устойчивости к внешним воздействиям

1. Климатические испытания УХЛ2.1 по ГОСТ 151500:

1.1. Высота над уровнем моря до 1000 м.

1.2. Температура окружающей среды при эксплуатации:

– верхнее значение + 40 °С

– нижнее предельное значение –60 °С

2. Камеры КДВ-110 должны быть устойчивы к воздействию механических нагрузок группы М6 по ГОСТ 17516.1-90.

Важным фактором, которым не в коей мере нельзя пренебрегать - оплавление и эрозия контактов. И они тем выше, чем выше напряжение рабочего диапазона. Эти дефекты в свою очередь связаны с материалом контактов. В результате исследований различных типов комбинаций материалов для вакуумных электродов, были выделены Cu, Cu-Bi и Cu-Cr, бескислородный медный сплав хрома, но Cu-Cr - лучший до сих пор (рис.1.11) [10].

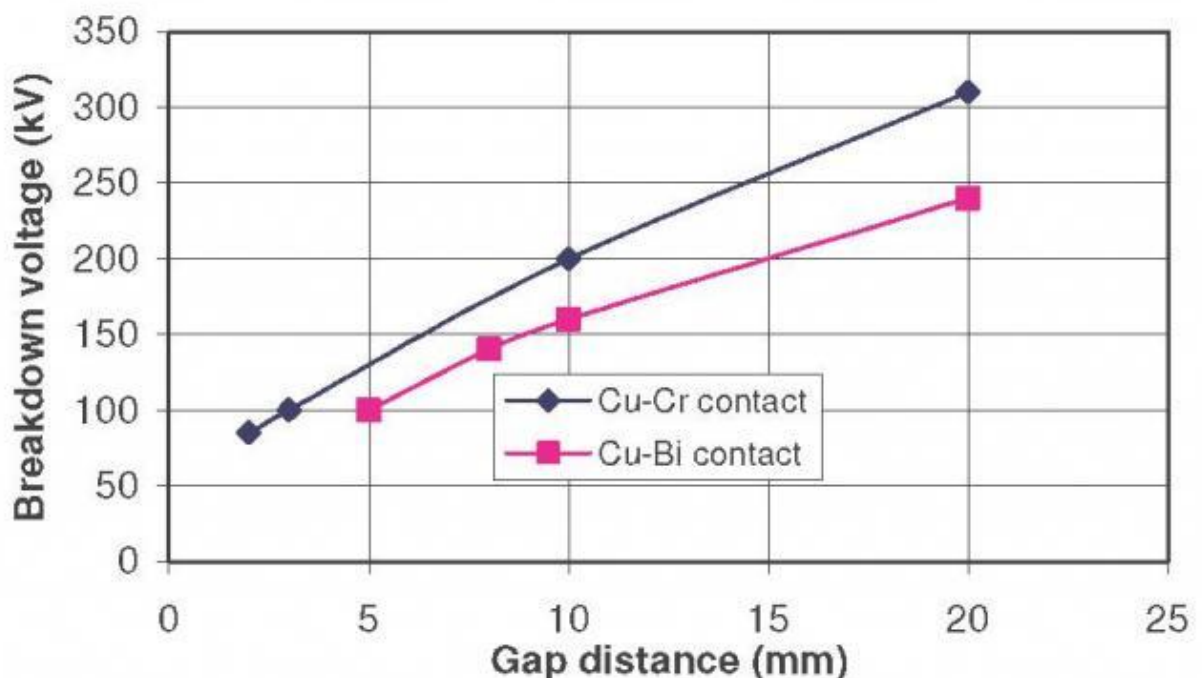


Рис. 1.11. Напряжение пробоя Cu-Cr и Cu-Bi между контактами в зависимости от расстояния [10]

Чтобы более подробно разобрать проблему деградации поверхностей электродов КДВ, было принято решение провести анализ поверхности электродов, прошедших полный цикл работы, с целью выявления образующихся дефектов и перераспределения элементного состава электродов.

1.4 Технологии, применяемые при производстве металлокерамических дугогасительных камер

1.4.1 Удаление газов из внутреннего объема КДВ

При производстве и обработке металлических частей любого оборудования будет происходить адсорбирование газов поверхностными слоями металла, а также растворение этих газов в объеме образцов. В вакуумной среде эти газы наоборот начинают выделяться из металла. Скорость этого выделения будет зависеть в большей мере от объема сорбированного газа и температуры. Важную роль здесь играет энергия активации сорбционного процесса. Для большинства металлов не прошедших обработку (что предполагает наличие на их поверхности тонких слоев окисла и других загрязнений) начальная скорость выделения газа при комнатной температуре будет порядка $10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$.

В большинстве металлов, их поверхность покрыта «пористым» слоем окисла. При этом условии газ вначале будет диффундировать сквозь этот слой и только затем адсорбироваться поверхностью.

В этом случае, скорость выделения газа будет дополнительно определяться скоростью диффузии газа через поры загрязнений или по границам зерен окисленного слоя. Подтверждением данных слов служит то, что время, необходимое для удаления газа с металлических элементов на практике (когда в поверхностных слоях присутствуют загрязнения) больше, чем время по

теоретических расчетах. Также на скорость газовой выделения будет влиять состояние этих газов. Когда выделился весь поверхностно адсорбированный газ, скорость газовой выделения уменьшается по экспоненциальному закону до очень низких значений. При этом скорость газовой выделения лимитируется скоростью диффузии газа, растворенного в объеме, и становится обратно пропорциональной корню квадратному из времени.

Уже давно многими авторами было определено, что в объеме металлов обычно растворяются H_2 , N_2 , O_2 , CO и CO_2 . Эти газы поглощаются главным образом на стадии плавки металла и образуются из доменного или атмосферного газа. Часть газов при растворении способны образовывать с металлом различные соединения, тогда как другие растворяются по физическому механизму.

При затвердевании расплава происходит лишь частичное газовыделение, а основная часть газа остается в металле. Обычно содержание газа в металле составляет от 10 до 100 об. % от его значения при нормальных условиях.

Наличие газа в металлах не всегда связано с процессами плавления, поскольку газы могут диффундировать во многие металлы, находящиеся в твердом состоянии. Процесс диффузии при комнатной температуре происходит сравнительно медленно, поэтому обезгаженные металлы могут храниться в течение нескольких суток без существенного увеличения содержания газов. Однако с повышением температуры скорость диффузии возрастает по экспоненциальному закону.

Инертные газы являются исключением и не растворяются даже в расплавленных металлах. Тем не менее, растворы инертных газов в металлах могут образовываться в результате ионизации и последующего внедрения ускоренных ионов или при бомбардировке металла высокоэнергетическими нейтральными частицами.

Рассмотрим три основных газа, которые наиболее интересны нам и с большей вероятностью могут присутствовать в исследуемых поверхностях – водород, кислород и азот.

Водород. По отношению к растворимости водорода металлы могут быть отнесены к двум группам: образующие истинные растворы и гидриды/псевдогидриды. Для металлов первой группы растворимость пропорциональна корню квадратному из парциального давления водорода и возрастает с температурой. К этой группе относятся металлы (в порядке увеличения растворимости): Al, **Cu**, Pt, Ag, Mo, W, **Cr**, Co, Fe, Ni.

Кислород. Кислород растворим в большинстве металлов, но во всех случаях после перехода за предел растворимости в твердом состоянии появляется оксидная фаза. Поэтому трудно отличить растворение собственно кислорода от растворения оксидов, которые образуются в больших количествах в процессе плавки металла. Вследствие этого количество кислорода, способное выделиться в вакуумную систему, может значительно превышать количество кислорода, которое может быть растворено в твердом металле.

Азот. Азот растворяется только в тех металлах, которые при более высоких температурах образуют нитриды, например, Zn, Ta, Mn, Mo и Fe. Установлено, что в обычных условиях азот нерастворим в Co, **Cu**, Ag и Au. Но при наличии дополнительного фактора (повышенной температуры, давлении и тд) реакция растворения все же вероятна.

Обезгаживание металлов происходит вследствие их нагревания в условиях вакуума непосредственно в самой установке (в нашем случае, печи). Однако ввиду того что скорость диффузии растворенного газа экспоненциально зависит от температуры, предпочтительнее проводить обезгаживание при максимально возможных температурах (не превышающих температуру размягчения металла), что не всегда представляется возможным для всей вакуумной системы. Поэтому часто проводят обезгаживание отдельных частей

установки перед ее сборкой, поскольку повторное поглощение новых порций газа при комнатной температуре происходит относительно медленно.

Для обезгаживания металла используются по отдельности или в комбинации следующие способы:

- 1) плавка в вакууме;
- 2) предварительное (до сборки) прокаливание готовых деталей в условиях вакуума;
- 3) прогрев частей вакуумной установки в собранном виде при одновременном откачивании приборов.

В настоящее время вакуумная плавка металлов осуществляется в промышленных масштабах, что позволяет широко применять многие металлы, обезгаженные этим способом. Следует, однако, отметить, что металлы, полученные методом вакуумной плавки, имеют относительно высокую стоимость, поэтому их применение все же ограничено.

Обычно такие металлы применяются в тех случаях, когда требуется полное отсутствие кислорода или его соединений. Однако на практике трудно ожидать преимуществ от использования металла, полученного методом вакуумной плавки, поскольку в процессе изготовления деталей вакуумной установки практически невозможно избежать загрязнения поверхности маслами или образования окислов, особенно при пользовании такими методами обработки, как горячая ковка, прессование или сварка.

Поэтому предварительное обезгаживание готовых деталей вакуумной установки перед ее сборкой применяется, пожалуй, чаще всего. Вначале деталь подвергается очистке химическими методами для удаления поверхностной окисной пленки или других загрязняющих веществ, например, следов масел, используемых при механической обработке. Затем деталь прокаливают либо в условиях вакуума (10^{-2} Па) при высокой температуре, либо в потоке горячего

сухого чистого газа, который плохо адсорбируется металлом или же легко удаляется.

Для дегазации деталей электровакуумных приборов используется водород, который восстанавливает имеющиеся окислы и, вследствие своей высокой скорости диффузии, достаточно легко удаляется в процессе дальнейшей обработки. Этот метод наиболее экономичен, поскольку не требует использования вакуумной установки и позволяет проводить непрерывную загрузку деталей в горячую печь с помощью конвейера.

Рабочая температура печи и время прокаливания определяются несколькими факторами. Очевидно, температура не должна быть настолько высокой, чтобы происходило заметное испарение металла. На практике используются более низкие температуры, определяемые возможной деформацией деталей или, в некоторых случаях, конструкцией печи. Другими словами, температура должна быть близкой к точке отжига, поскольку при такой температуре происходит релаксация внутренних напряжений.

Азот, составляет большую часть всех адсорбированных газов. Для полного его удаления, медь должна прокаливаться при температурах 500 - 700 °С.

Время прокаливания должно быть по возможности большим. Но, поскольку большинство газов удаляется в первые несколько часов, обычно достаточно прокалить в течение 8 ч (в нашем же случае, практика показала, что для данных приборов достаточно 2 часа). С учетом времени, необходимого для нагрева и охлаждения, весь процесс обезгаживания достаточно проводить в течение полусуток.

При сборке вакуумной установки следует с особой осторожностью обращаться с прокаленными деталями, поскольку любое прикосновение к поверхности может приводить к значительному увеличению скорости

последующего газовыделения, причем это увеличение происходит отчасти за счет газа, вновь адсорбированного в объеме.

Нагрев металлических деталей в вакуумной системе с целью обезгаживания можно осуществлять следующими методами:

- 1) внешней печью;
- 2) непосредственным пропусканием тока через деталь (омический нагрев);
- 3) токами высокой частоты;
- 4) электронной или ионной бомбардировкой.

Первый метод обычно позволяет достигать температур не выше 500 °С, а остальные - значительно более высоких.

Поскольку большую часть поверхностно-адсорбированного газа составляют пары воды, отжиг в течение длительного времени при температурах 200 - 250 °С заметно снижает последующую скорость газовыделения, и поэтому некоторые исследователи считают достаточным проводить обезгаживание при таких температурах. Однако наилучшее обезгаживание получается в случае отжига при температурах 400 - 450 °С в течение по крайней мере 16 ч, что весьма важно для достижения сверхвысокого вакуума.

К металлам, используемым для изготовления оболочечных элементов вакуумных установок, предъявляется дополнительное требование малой газопроницаемости. В металле газ диффундирует по междоузлиям решетки, а не по границам зерен металла. Поэтому способностью проникать сквозь металл обладают только те газы, которые в нем растворимы. Таким образом, гелий и другие инертные газы не могут диффундировать сквозь металлы даже при повышенных температурах, тогда как для кислорода и водорода большинство металлов в той или иной степени газопроницаемы.

Прошедшие сквозь металл атомы рекомбинируют в процессе десорбции на стороне низкого давления. Водород, обладающий наивысшей скоростью диффузии, составляет основную часть газа, проникающего сквозь металлы.

Скорость проникновения водорода относительно высокая. Поступление водорода сквозь поверхностные слои также может происходить вследствие коррозии при взаимодействии с порами воды (в результате такой реакции образуется водород). Поскольку содержание свободного водорода в воздухе в 105 раз меньше, чем в водяных парах, коррозия, по всей вероятности, является основным источником водорода, поступающего в систему.

Скорости проникновения всех остальных газов сквозь большинство металлов по крайней мере на порядок ниже, чем для водорода, поэтому на практике их можно не учитывать.

1.4.2 Пайка в водородных печах

Пайка в печах наиболее полно воплощает в себе технологические возможности и особенности процесса, обеспечивает стабильность качества соединений различных деталей, позволяет максимально механизировать и автоматизировать изготовление паяных изделий; за счет групповой обработки может быть весьма экономичной.

Пайка – сложный физико-химический процесс получения неразъемного соединения в результате взаимодействия твердого паяемого и жидкого припаяемого металлов (припоя) соединяемых деталей. Формирование шва при пайке происходит путем заполнения припоем зазора между соединяемыми деталями, т.е. процесс пайки связан с капиллярным течением. Процесс пайки осуществляется при температурах, лежащих ниже температуры плавления паяемого материала.

Пайка имеет преимущества перед другими способами соединения деталей: возможность соединения в единое целое за один прием множества

заготовок, составляющих изделие. Пайка позволяет соединять разнородные металлы, а также металлы с керамикой. При пайке не происходит расплавления кромок паяемых деталей, что дает возможность сохранить в процессе производства форму и размеры изделия.

Широкое применение при пайке в вакуумных и водородных печах получил припой ПСр 72 (также ПСр 50, ПСрМПд 68) - сплав эвтектического состава (на основе серебра с содержанием меди или палладия), обладающий высокой технологичностью. Припои, содержащие серебро, обладают и повышенной тепло- и электропроводностью, высокими пластичностью, прочностью, коррозионной стойкостью и технологичностью. Поэтому эти припои широко применяются при пайке изделий, вакуумной техники и конструкций, подвергающихся высоким механическим нагрузкам.

Титановые припои обладают повышенной активностью и способностью смачивать поверхности тугоплавких металлов и металлов, покрытых окислами. Пайку металлов (в основном меди) титановыми припоями производят в вакууме при этом обеспечивается равномерных нагрев соединяемых деталей без деформации даже при больших габаритах изделия.

Пайку в вакууме и водороде успешно применяют для соединения многих металлов. Этот вид пайки достаточно экономичен, совершенно безопасен. Паяные швы, полученные при использовании нагрева вакууме, отличаются чистотой исполнения, прочностью металла шва и высокой коррозионной стойкостью.

1.5 Недостатки данной технологии и пути решения

Применяемые в настоящее время, как у нас, так и за рубежом технологии производства крупногабаритных, высоковольтных, особо высокой чистоты, герметичных высоковакуумных изделий, каковыми являются КДВ на 110 кВ, остаются низкопроизводительными. Для изготовления

крупногабаритных, герметичных высоковакуумных изделий применяется традиционная технология сварки, вакуумирования и герметизации на откачных постах с помощью откачной трубки – штенгеля.

Предлагается разработать конструкцию и технологию групповой, одно-двухстадийной сборки КДВ с помощью высокотемпературной пайки и одновременного вакуумирования и герметизации по бесштенгельному способу в вакуумных печах большого объема.

Разработка новой технологии существенно снизит цену КДВ и ВВ, позволит получить отечественный конкурентоспособный, в том числе и на внешнем рынке, продукт. Производство обеспечит загрузку многих предприятий электротехнической промышленности и поставщиков комплектующих изделий, в том числе, производителей специальных материалов и высокотехнологичных деталей, а также создаст реальную конкуренцию элегазовым выключателям, поставляемым на рынок РФ зарубежными компаниями и условия для импортозамещения зарубежных аналогов по всему диапазону (от 3 до 110 кВ) вакуумных дугогасительных камер.

Решение этой задачи неразрывно связано с расширением производственных площадей, увеличением производственных мощностей за счет приобретения высокопроизводительного оборудования и другими организационно-техническими мероприятиями. Появилась необходимость создания сетевого графика производства, учитывающего внедрение нового оборудования и постройку производственных площадей.

1.6 Деятельность ООО «Вакуумные технологии». План развития

ООО «Вакуумные технологии» создано в 1999г. Основным видом деятельности предприятия является: изготовление металлокерамических

дугогасительных камер вакуумных и устройств переменного и постоянного тока на их основе.

Как уже упоминалось, вакуумные выключатели – одно из наиболее перспективных направлений развития коммутационной аппаратуры в классах 3 – 35 кВ. Параметры вакуумных выключателей определяются их основной частью – камерами дугогасительными вакуумными. Основными конструктивными узлами КДВ являются: контактная система и токовводы; экранная система и вакуумно-плотная оболочка. Все вакуумно-плотные соединения металла с металлом и металла с керамикой в КДВ осуществляют с помощью серебрясодержащих вакуумных припоев. Контакты камер изготавливаются из Cr-Cu композиции.

За последние годы предприятие разработало и внедрило в производство серию вакуумных дугогасительных камер пятого поколения на номинальные напряжения 10, 20, 35 и 110 кВ, номинальные токи 630, 1000, 1600, 3150А, номинальные токи отключения, 20, 31,5, 40 кА, которые по своим технико-экономическим показателям находятся на уровне лучших зарубежных аналогов, а по ряду показателей, например, по коммуникационному ресурсу, их превосходят.

В рамках развития ведутся опытные работы над выключателями постоянного тока на камерах вакуумных дугогасительных на токи от 100А до 500А и напряжение до 3кВ. В последние годы предприятие проводит диверсификацию производства и осуществляет выпуск контакторов вакуумных на токи от 250А до 600А и напряжение до 10 кВ переменного тока.

Целью данного предприятия являлось создание технологии производства вакуумных дугогасительных камер для обеспечения создания конкурентоспособного продукта, позволяющего обеспечить рынок Российской Федерации и экспорт.

1.7 Постановка цели и задач. Выводы по I главе

Из всего вышеперечисленного, можно сформировать цель данной работы - промышленная реализация бесштенгельной групповой откачки и сборки крупногабаритных металлокерамических высоковольтных вакуумных дугогасительных камер в современных вакуумных печах большого объема и повышении эрозионной стойкости контактных материалов на основе сложных композиций.

Для реализации этой цели определены следующие задачи:

1. Отработать технологического процесса групповой двухстадийной сборки опытных образцов крупногабаритных металлокерамических камер типа КДВ-110 с использованием операций пайки высокотемпературными припоями и одновременного вакуумирования и герметизации бесштенгельным способом в современных компьютеризованных водородных и вакуумных печах с большими рабочими объемами в производственных условиях.

2. Оценить возможности и целесообразность использования в технологическом процессе способов контроля вакуума в готовых изделиях и герметичности их оболочек с помощью квадрупольных масс-спектрометров.

3. С помощью электронной растровой и атомно-силовой микроскопии получить данные о микрорельефе контактирующих поверхностей дугогасительной камеры до начала и после окончания её испытаний. Сформулировать рекомендации по увеличению срока службы изделий.

4. 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 деградационных процессов, вызываемых дугой в вакууме, и поиска путей повышения долговечности и надежности приборов.

Участие в разработке и внедрении технологических процессов на базе крупногабаритных КДВ-110 с технологией бесштенгельной откачки включает несколько основных направлений:

1. Участие в разработке конструктивных модулей для предварительного пошагового изготовления крупногабаритного изделия.

2. Участие в разработке и внедрении технологического процесса на базе бесштенгельной технологии на высокопроизводительной вакуумной печи дает широкие возможности для:

а) разработки и внедрения различных режимов термической обработки до 1250 °С крупногабаритных деталей значительных толщин с помощью титановых припоев, которые почти не применяются в вакуумной технике;

б) разработки и внедрения программ с выводом на компьютер для пайки-откачки и с использованием дополнительной операции-выдержки длительностью достаточной для откачки газа из объема камер через незапаянные швы при температуре не более 100 °С, позволяет применять бесштенгельную технологию для изготовления КДВ-110 большого размера;

в) разработки и внедрения программ с выводом на компьютер режимов охлаждения, позволяет в результате ступенчатого принудительного охлаждения снимать напряжения в паяных узлах и исключает растрескивание керамической оболочки крупногабаритных камер;

г) внедрения технологических режимов, обеспечивающих высокое качество за счет обезгаживания внутренней арматуры при более высокой температуре (650 – 700 °С), чем при штенгельной технологии (400 – 450 °С);

д) снижения себестоимости изготовления камер за счет повышения производительности, так как возможна групповая обработка камер и совмещение операций сборки, откачки и герметизации.

Появилась необходимость:

1. Оценить возможности и целесообразность использования в технологическом процессе способов контроля вакуума в готовых изделиях и герметичности их оболочек с помощью квадрупольных масс-спектрометров.

2. С помощью электронной растровой и атомно-силовой микроскопии получить данные о микрорельефе контактирующих поверхностей дугогасительной камеры до начала и после окончания её испытаний. Сформулировать рекомендации по увеличению срока службы изделий.

Необходимо разработать модель производства металлокерамических вакуумных дугогасительных камер, учитывающую расходы на приобретение и внедрение нового современного технологического оборудования и управление производством.

ГЛАВА II

Основные требования и этапы производства и совершенствования технологии изготовления высоковольтных сильноточных вакуумных дугогасительных камер

2.1 Переход производства крупногабаритных КДВ к бесштенгельным технологиям

В основу Российской технологии производства КДВ положена многостадийная технология сборки, пайки узлов в двух-колпаковых водородных и вакуумных печах большого объема с последующей откачкой вакуума на откачных постах через штенгель. Технологии штенгельного производства (откачки) мы уже касались ранее (раздел 1.3.3), разобрали основные этапы, особенности и недостатки.

При данной технологии увеличение объемов производства возможно только за счет расширения рабочих мест и увеличения количества оборудования. Мною было принято решение просчитать и разработать непрерывный технологический процесс одно-двухстадийной сборки КДВ с использованием операций пайки высокотемпературными припоями и одновременного вакуумирования и герметизации бесштенгельным способом в вакуумных печах большого объема.

В разделе 2.2 подробно описан этап, обеспечивающий выполнение поставленной промежуточной задачи. Она состоит в разработке конструкторской и технологической документации на камеру КДВ-110, организации системы контроля качества производства и технологических процессов, приобретения испытательного, технологического и контрольно-измерительного оборудования и т.д.

2.2 Основные этапы работы

Сетевой график представляет собой графическую модель, отражающую последовательность решения и количественные параметры задач управления производством (продолжительность, потребность в ресурсах, резервы времени). Он позволяет оптимизировать процесс решения задачи управления, например, месячное планирование поставок ресурсов по заводу.

Оптимизация сетевых графиков процессов управления по различным критериям (время, стоимость) создает основу для проектирования эффективного аппарата управления.

Сетевой график позволяет:

- выявить перечень работ;
- наглядно представить порядок их следования;
- определить длительности каждой работы и всего производства;
- определить резервы времени по каждой работе;
- и т.д.

В разработанном сетевом графике (рис.2.2) отражены этапы, обеспечивающие выполнение поставленной в работе задачи: разработка конструкторской и технологической документации на камеру КДВ-110, организация системы контроля качества производства и технологических процессов, приобретение необходимых материалов, испытательного, технологического и контрольно-измерительного оборудования, включая акты об организации серийного производства изделий.

1 - Оптимизация по результатам НИР варианта конструкции контактной и экранной систем, керамического корпуса, сильфонного узла, электромагнитных катушек и токопроводов с изготовлением и испытанием макетного образца вакуумной дугогасительной камеры на напряжения до 110 кВ:

t_1 — переход от Нировского прибора к разработке чертежей на металлические и керамические элементы конструкции прибора КДВ-110;

2 - Разработка технического конструктива КДВ-100 под новые габариты камеры (диаметр 200-250 мм и длина 800-1200 мм) и новые параметры (номинальное напряжение 110 кВ) (рис.2.1);

3 - Разработка технологического процесса групповой двухстадийной сборки опытных образцов крупногабаритных КДВ с использованием операций пайки высокотемпературными (до 900°C) припоями и одновременного вакуумирования и герметизации бесштенгельным способом в вакуумных печах большого объема, включающего в себя следующие этапы (рис.2.2):

t_3 – технологические процессы и этапы первой (по очереди) пайки медно-никелевого узла вольфрам-титановым припоем (до 900 °C); последующей сборки и пайки (в два или три приема) конструкции токопроводящего узла серебрянно-никелевым ПСр72В (810 °C) припоем всего прибора, включая корпус (керамическую оболочку) в целом (рис.1.5; 1.6; 2.6);

3.1 - Оптимизация серийной технологии одновременного вакуумирования и герметизации КДВ (раздел 2.4);

3.2 - Подбор материалов покрытий, припоев, а также технологических режимов сборочных операций;

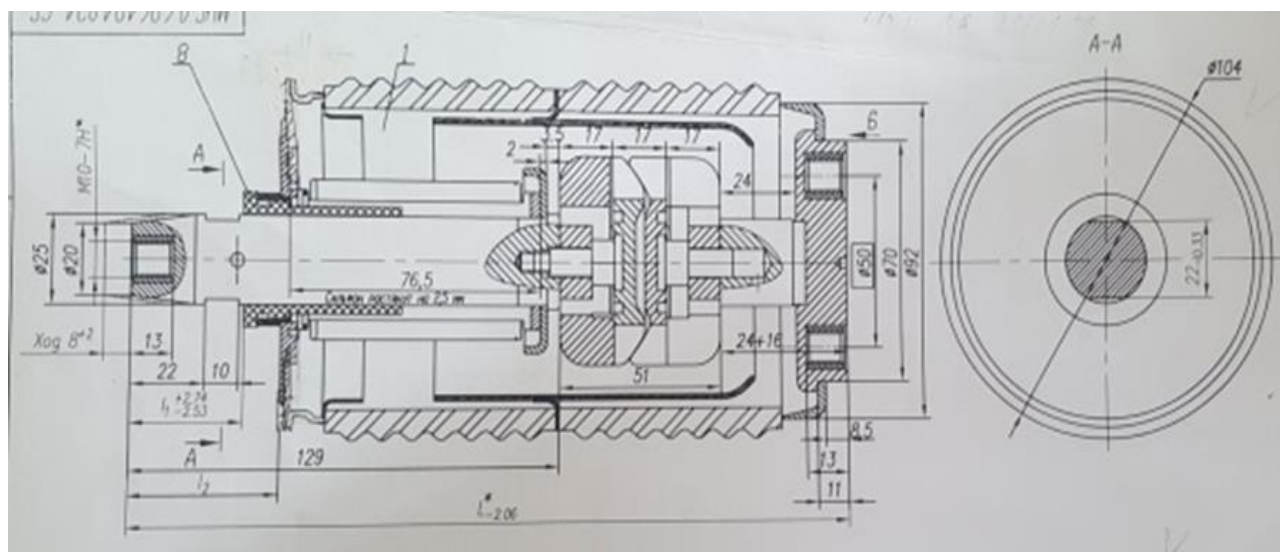


Рис. 2.1. Чертеж бесштенгельной камеры

Оптимизация технологической операции пайки силфона из нержавеющей стали.

t_3^* - разработка и описание технологии пайки узлов и приборов в целом (раздел 2.4);

3.3 - Оптимизация материалов покрытий, припоев в сочетании с оптимизацией технологических режимов;

3.4 - Разработка технологии чистого процесса подготовки, хранения и сборки деталей с использованием шлюзовых камер, защитной атмосферы и чистых комнат (раздел 2.5);

3.5 - Разработка методов пооперационного контроля качества; разработка и внедрение в производство методик контроля качества поверхности свариваемых деталей, начиная с заготовительной; контроля вакуума, остаточных газов и натекания в отпаянных приборах;

3.6 - Определение точек оптимизации пооперационного контроля качества (раздел 2.4);

3.7 - Использование процесса откачки КДВ через щелевые зазоры, подбор температурных и скоростных режимов откачки, нагрева и охлаждения (раздел 2.3);

3.8 - Разработка технологии контроля вакуума в отпаянных изделиях и их надежности (раздел 2.6);

3.9 - Разработка технологии высоковольтной тренировки;

4 - Проектирование и изготовление оснастки для производства камеры КДВ-110;

t_4 – проектирование и изготовление оснастки для камеры КДВ-110, включая приспособления, используемые для пайки приборов и узлов;

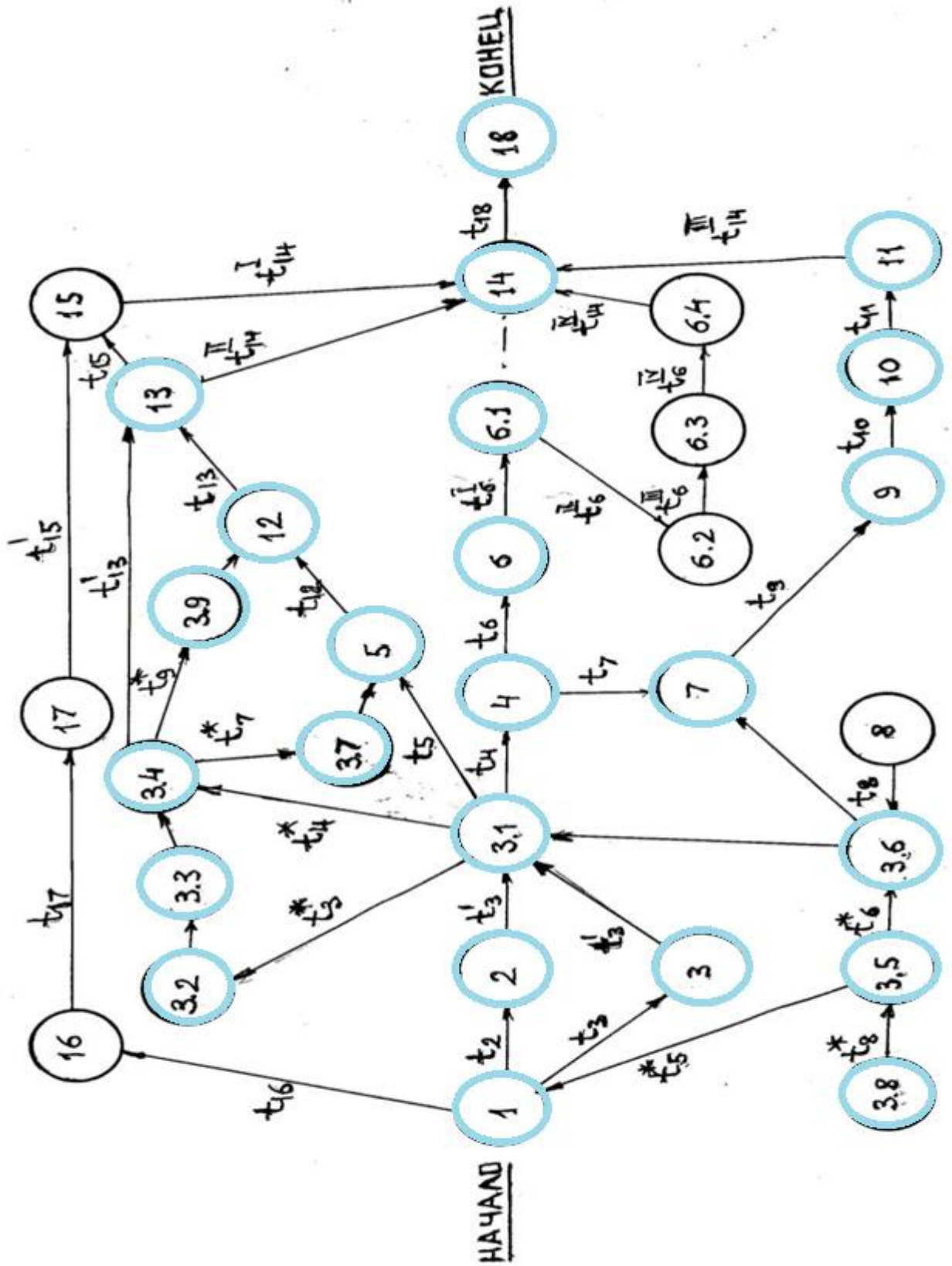


Рис. 2.2. Сетевой график реализации работы (проекта)

5 - Оптимизация бесштенгельного технологического процесса при производстве вакуумных дугогасительных камер на напряжения ниже 110 кВ с учетом положительного опыта изготовления крупногабаритных высоковольтных камер (раздел 2.4);

t_5 – время оптимизации откачки через щели вакуумной камеры КДВ-110 (раздел 2.3);

6 - Мероприятия по импортозамещению зарубежных КДВ отечественными (рязанскими) аналогами, включая КДВ-110, в российской коммутационной аппаратуре, включающей в себя следующие этапы:

6.1 - Оптимизация системы импортозамещения;

6.2 - Анализ конструкторской КДВ, изготовленных на фирмах (Китай) и Siemens (Германия) и присоединительных мест их в коммутационной российской аппаратуре и определение требований к конструкции приспособлений для адаптации отечественных (рязанских) КДВ, включая КДВ-110;

6.3 - Разработка конструкторской и технологической документации для изготовления приспособлений к отечественным (рязанским) КДВ, включая КДВ-110, и планируемых к использованию в российских коммутационных выключателях вместо зарубежных аналогов; разработка технологии автоматизированного проектирования изделий и КД на приспособления по посадочным и присоединительным местам в коммутационной аппаратуре при замене зарубежных аналогов отечественными (рязанскими);

6.4 - Изготовление опытных образцов приспособлений для КДВ, включая КДВ-110, испытание их возможностей импортозамещения, корректировка конструкционной и технической документации (КД и ТД) для серийного производства;

7 - Изготовление опытных образцов вакуумной дугогасительной камеры с напряжением до 110 кВ (КДВ-110) (раздел 2.4 – 2.5; рис. 2.8);

t_7 – суммарное время изготовления опытных образцов камер КДВ-110;

8 - Приобретение дополнительного контрольно-испытательного оборудования;

t_8 – испытание прибора КДВ-110 на новом (до 150 кВ) контрольно-испытательном стенде;

9 - Испытание опытных образцов камеры КДВ-110 на соответствие требований технического задания;

t_9 – испытание прибора КДВ-110 на соответствие механо-климатических условий ТУ;

10 - Корректировка конструкторской и технологической документации на камеру КДВ-110 по результатам испытаний опытных образцов;

11 - Разработка технических условий на вакуумную дугогасительную камеру на напряжения до 110 кВ (КДВ-110);

12 - Испытания опытных и серийных образцов вакуумных дугогасительных камер с напряжением (10÷110 кВ) (раздел 1.3);

13 - Корректировка технологической документации на производство вакуумных дугогасительных камер с напряжением 10÷40 кВ с учетом современной материально-технологической базы и унифицированной технологии бесштенгельной откачки изделий, разработанной для камеры КДВ-110;

14 - Постановка на производство разработанных технологий, изделий (камер, разрядников) и приспособлений;

t_{14} – подготовка документации (КД и ТД) на камеру КДВ-110 для организации производства;

15 - Проведение сертификационных испытаний вакуумных дугогасительных камер с напряжением 10÷110 кВ в составе аппаратов на их основе;

t_{15} – протоколы сертификационных испытаний камеры КДВ-110;

16 - Закупка, установка и ввод в эксплуатацию нового технологического и контрольно-испытательного оборудования;

17 - Обучение технического персонала эксплуатации (работе) нового технологического контрольно-испытательного оборудования;

18 – Внедрение результатов работы в серийное производство камеры КДВ-110;

t_{18} – акт о внедрении результатов работы в производство.

Все задачи имеют строгую последовательность: от анализа конструкции зарубежных КДВ до разработки КД, ТД, изготовления, испытания и поставки на производство приспособлений для замены их отечественными аналогами в коммутационной российской аппаратуре.

На сетевом графике отражены этапы, связанные с приобретением и настройкой технологического (точка 16) и контрольно-испытательного оборудования (точка 8); с подготовкой (обучением) инженерно-технических кадров (точка 17) для работы и обслуживания этого современного высокопроизводительного оборудования.

Данный сетевой график также описывает все этапы по импортозамещению КДВ на образцы отечественного производства, включая КДВ-110 (точка 6).

Научный задел по новой конструкции КДВ-110 и технологии бесштенгельной откачки (раздел 2.5) и герметизации металлокерамических высоковольтных вакуумных дугогасительных камер определяет старт (начало) работы (раздел 2.4). Завершение (конец) в сетевом графике отражено организацией серийного производства изделий и актом внедрения.

Анализ сетевого графика показывает хорошую взаимосвязь разных направлений исследований:

- разработка конструкций вакуумных дугогасительных камер (раздел 1.3; рис. 2.2),

- разработка и совершенствование технологии их изготовления (разделы 1.4.2 – 1.4.3, 2.4),
- разработка методов и систем контроля качества (раздел 1.4.3, 2.4),
- разработка приспособлений для импортозамещения зарубежных камер отечественными.

Все эти направления подчинены решению проблемы:

- увеличение объемов производства под реальные заказы потребителей,
- обеспечение финансовых условий для возврата средств выделенного кредита,
- решение задач импортозамещения и экспорта создаваемой продукции.

С целью обеспечения качества выпускаемых изделий установлены контрольные точки, касающиеся моего исследования:

- технология серийных одновременных вакуумирования и герметизации КДВ на новом оборудовании (точка 3.1);
- разработка методов пооперационного контроля качества - контроль вакуума, остаточных газов и натекания в отпаянных приборах (точка 3.5);
- использование процесса откачки КДВ через щелевые зазоры, подбор температурных и скоростных режимов откачки, нагрева и охлаждения (точка 3.7);
- разработка технологии контроля вакуума в отпаянных изделиях и их надежности (точка 3.8).

2.3 Методика контроля вакуума и натекания остаточных газов

2.3.1 Рост абсорбционных слоев

Поверхностная адсорбция - поглощение газа (паров жидкости) поверхностью твердого тела. На поверхности любого твердого тела присудствуют участки, на которых обеспечивается химическая связь с адсорбированными частицами. При адсорбции происходит уменьшение поверхностной энергии.

С ростом числа адсорбированных частиц уменьшается концентрация свободных химических связей. Как было показано в [67], частицы, численность которых достаточна для насыщения всех поверхностных связей, образует монослой. Обычно это достигается тогда, когда один адсорбированный атом приходится примерно на четыре атома поверхности.

Адсорбция газов или паров жидкости рассматривается как динамический процесс, при протекании которого число уходящих с поверхности молекул в единицу времени за счет теплового движения, равно числу вновь адсорбированных частиц.

Г.А. Месяц показал [57], что энергия связи при физической адсорбции существенно ниже, чем при химической. Один и тот же газ по-разному вступает в реакцию химической адсорбции с различными металлами. Наиболее активен кислород. Он адсорбируется практически на всех металлах.

При адсорбции атомов на поверхности металла изменяется работа выхода электронов. Это происходит из-за захвата свободных электронов электроотрицательными атомами. В результате напряженность поля двойного электрического слоя вблизи металла увеличивается, что препятствует выходу электронов и приводит к увеличению работы выхода. Наличие электроположительных атомов, приводит к противоположному результату.

Рост абсорбционных слоев можно сравнить с ростом пленок на подложках, они имеют сходные механизмы образования.

Формирование тонких пленок на поверхности происходит в две стадии:

- а) стадия образования «зародышей» - возникновение критических точек, способствующих росту;
- б) стадия роста пленки - критические «зародыши» разрастаются и сливаются друг с другом, образуя сплошную пленку на поверхности.

Однако такой механизм начала образования пленок не единственный, на поверхности с шероховатостью или другими дефектами могут работать другие механизмы роста. Среди них выделяют три наиболее часто встречающихся:

- 1) механизм роста Фольмера-Вебера;
- 2) послойный механизм Франка - ван-дер-Мерве;
- 3) спиральный механизм Странского.

Основное внимание хочется уделить третьему механизму роста. Механизм роста Странского (или Странски-Крастанова) можно назвать промежуточным механизмом. Его особенность в том, что в начале рост на поверхности идет как послойный механизм, после образования начальных слоев, механизм роста меняется на островковый. Заметим, что время образования абсорбированного слоя (τ) зависит от давления среды (P) и для вакуумной техники, где используется рабочий вакуум ($P = 10^{-6}$ Па), оно равно 1 секунде ($\tau = 10^{-6}/P$).

Условием реализации этого механизма - значительное рассогласование в структуре решетки материала подложки (в нашем случае, электрода) и абсорбированных материалов (частицы обрабатывающих инструментов [Ag, Fe, Zn] и остаточных атомов [H, O, N]). При таких условиях в начальных слоях возникают упругие напряжения. Поверхностные слои деформируются, чтобы постоянная их решетки совпадала или приближалась близко к постоянной решетки электродов.

Движущая сила для образования трехмерных «островов» - объемная упругая релаксация поверхности. Механизм Странского лежит в основе формирования полупроводниковых квантовых точек.

2.3.2 Методика контроля вакуума и натекания остаточных газов

Методика контроля вакуума и натекания остаточных газов в металлокерамических дугогасительных камерах должна является неотъемлемой частью производственного процесса на любой стадии, так как внутри оболочки таких камер необходимо создавать и поддерживать вакуум порядка $7,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. на время их эксплуатации (в течение всего рабочего цикла аппаратуры).

Как известно, в ходе коммутации электрической цепи в полости камеры, происходит гашение электрической дуги и прекращение тока. На завершающей стадии размыкания происходит расплавление и испарение материала контактов, как раз в ионизированных парах испаренного металла возникает электрический разряд, который переходит в дуговую стадию. Благодаря низкому давлению в камере, вокруг контактов происходит интенсивная диффузия (деионизация) дугового столба с последующим гашением плазменной дуги. Поэтому в настоящее время очень важным является вопрос правильного контроля вакуума в объеме дугогасительных камер, чтобы в дальнейшем избежать порчи оборудования, продлить рабочий цикл приборов и улучшить их коммутационные характеристики.

В данном исследовании применялась квадрупольная система КМС-250 (разработка Рязанского предприятия ООО «Шибболет»), которая зарегистрировала состав остаточных и рабочих газов на одном из технологических этапов.

Устройство и принцип действия КМС-250 поясняет рисунок 2.3.

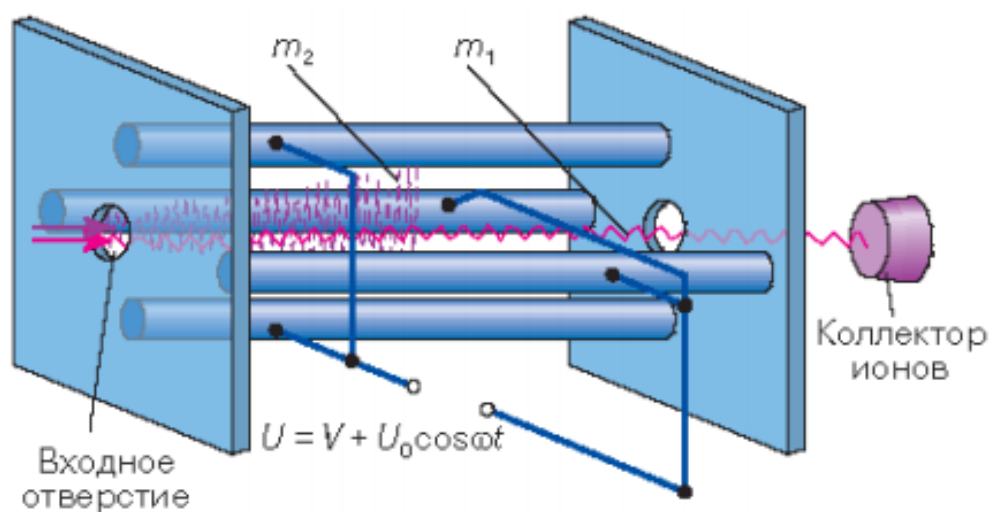


Рис. 2.3. Схема квадрупольного масс-спектрометра

За счет четырех цилиндрических электродов подается комбинированное высокочастотное переменное и постоянное электрическое напряжение вида $U = V + U_0 \cos(\tilde{\omega}t)$, которое вынуждает ионы совершать колебательное движение в такт с частотой $\tilde{\omega}$ этого поля. При определенных значениях величин U_0 , V и $\tilde{\omega}$ в выходную щель масс-анализатора будут проходить только ионы с определенной массой m , соответствующих условию:

$$m = \frac{aU_0}{\tilde{\omega}^2}, \quad (2.1)$$

где a – постоянная прибора. Все ионы, массы которых отличаются от заданной, будут двигаться с нарастающими амплитудами колебаний и нейтрализуются на стенках электродов. За счет изменения амплитуды высокочастотного напряжения U_0 или его частоты $\tilde{\omega}$ квадрупольный масс-спектрометр перестраивается и регистрирует спектры ионов, различающихся по массе и заряду.

Для продуктивного внедрения на производства квадрупольного масс-спектрометрического контроля вакуума и натекания остаточных газов в

металлокерамических дугогасительных камерах сначала надо разобрать 3 задачи:

1. Изучить принцип работы квадрупольного масс-спектрометра.
2. Изучить технологии, используемые при контроле вакуума и натекания остаточных газов.
3. Оценить возможность применения существующего метода для конкретного производственного процесса за счет изменения компонентов и параметров системы.

Повышение чувствительности метода контроля, возможно обеспечить использованием масс-спектрометра, поскольку его разрешающая способность довольно высока для данных видов производства. За счет увеличения формы массового пика, возможно также получить большую разрешающую способность, следовательно, данный метод станет более точным.

Для организации точной проверки и получения достоверных данных необходимо соблюдение ряда требований по подготовке поверхности КДВ. В настоящее время реализуется следующая схема технологического процесса:

1. Поверхность КДВ при проверке на герметичность должна быть очищена от масла, эмульсии и других загрязнений.
2. Органические загрязнения с доступных участков КДВ следует удалять промывкой при помощи органических растворителей (в качестве очищающих жидкостей следует использовать: спирт, ацетон, хладон-113 или другие органические растворители, которые обеспечат качественное удаление загрязнений).
3. После процедуры промывки следует продуть камеру сухим чистым воздухом до полного удаления остаточных частиц растворителя.
4. Произвести тщательный осмотр и проверка чистоты поверхности.

После этих операций можно приступить к контролю герметичности. В случае невозможности выполнения контроля герметичности непосредственно

сразу после осушки, хранение подготовленных КДВ допускается в стерильных условиях не более суток. Контролируемые участки должны быть защищены от попадания загрязнений и жидких сред защитными материалами. Влажность воздуха в помещении не должна превышать 80%.

2.3.3 Метод обдувом гелия

Сущность метода заключается в том, что вакуумная дугогасительная камера, подвергаемая контролю, подключается к квадрупольному масс-спектрометру, вакуумируется до давления, которое позволяет открыть входной клапан масс-спектрометра. После этого поверхность КДВ обдувается гелием. При наличии в КДВ течи гелий попадает в полость и фиксируется масс-спектрометром. (Рис. 2.4)

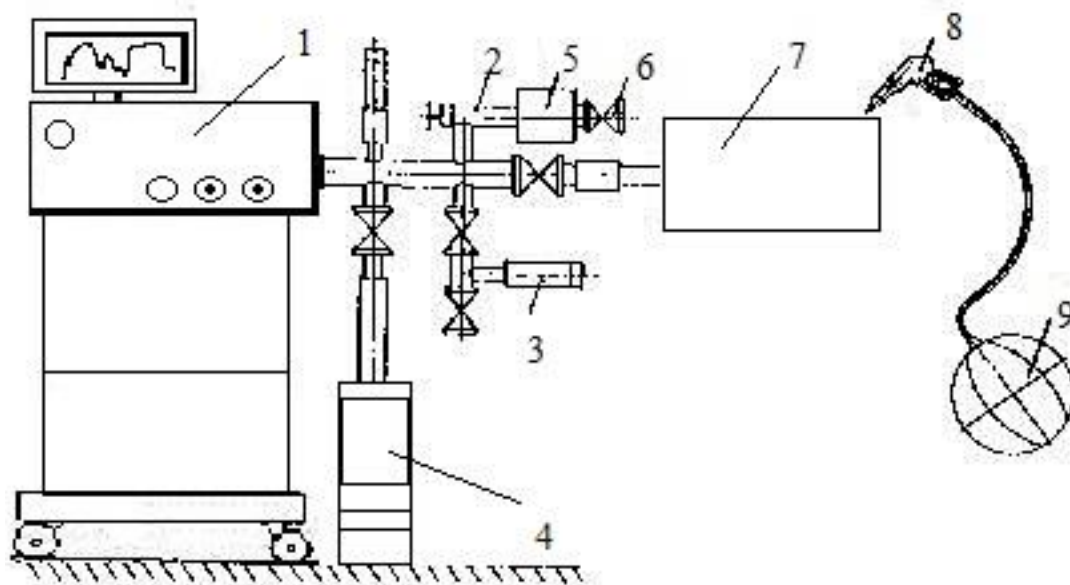


Рис. 2.4. Схема установки для контроля методом обдува гелием

1 – квадрупольный масс-спектрометр, 2 – натекатель, 3 – гелиевая течь, 4 – вакуумный насос, 5 – баллон с аргоном, 6 – вакуумный клапан, 7 – КДВ, 8 – обдуватель, 9 – камера с гелием.

Подготовленная КДВ в соответствии требованиям подготовки поверхности вакуумируется до давления порядка $7,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. При

открытом на КДВ входном клапане квадрупольного масс-спектрометра отключается система вспомогательной откачки и проводится обдувание гелием наружной поверхности изделия. Обдув следует начинать с мест подсоединения системы вспомогательной откачки к квадрупольному масс-спектрометру, затем места пайки и сплавов, заканчивая полной проверкой поверхности. На первой стадии испытаний, нужно установить сильную струю гелия, которая при обдуве охватывает большую площадь. При обнаружении течи уменьшить струю гелия так, чтобы она слегка чувствовалась при поднесении, и точно определить место сквозного дефекта. Скорость перемещения обдувателя по поверхности составляет 0.10 – 0.15 м/мин. До начала испытания масс-спектр будет выглядеть как прямая линия, параллельна оси шкалы масс, т.к. вакуумированный объем не содержит никаких элементов (Рис. 2.5).

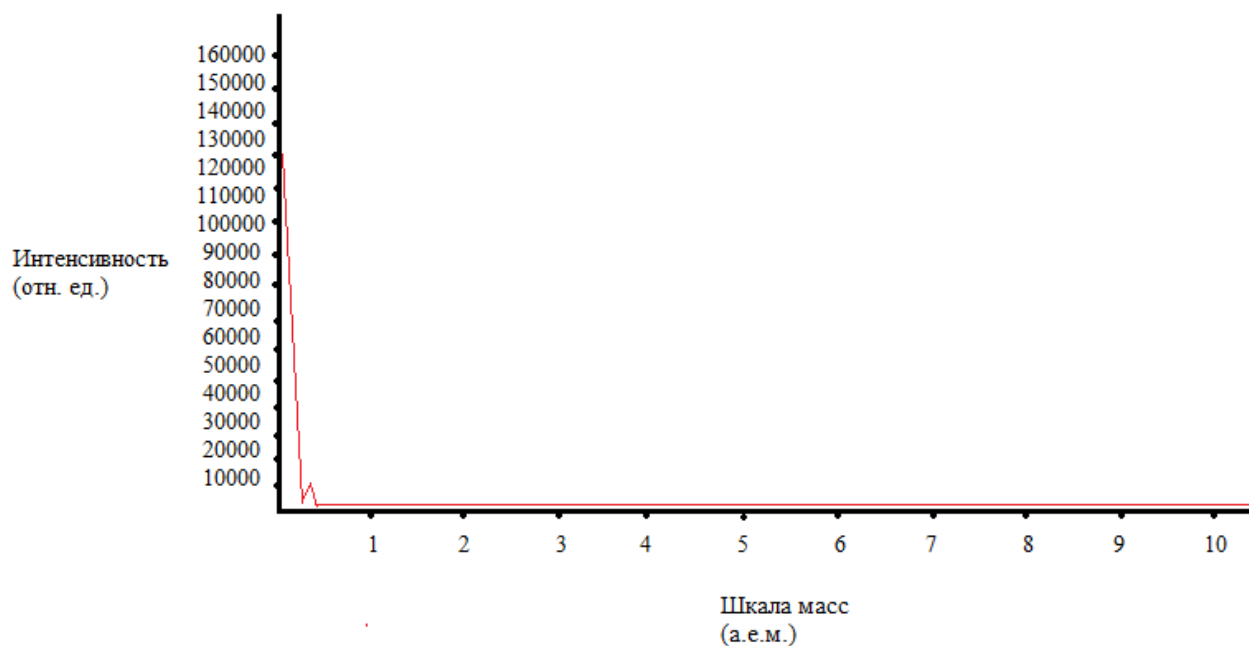


Рис. 2.5. График формирования пиков масс-спектрометра до испытания

Как только начинают появляться изменения в графике, вырисовываться пик, необходимо снизить поток гелия и визуально попытаться найти дефект, следя за показаниями масс-спектрометра. При обдуве области с дефектом поток

гелия в камеру будет виден на экране масс-спектрометра, следовательно, станет известна область, в которой располагается отверстие.

Данный метод использовался на предприятии до приобретения печей большого объема (при штенгельном способе), так как подключение к датчику происходит как раз через штенгель.

2.3.4 Метод вакуумной камеры

Сущность метода вакуумной камеры заключается в том, что КДВ помещается в герметичную металлическую камеру, внутренняя поверхность которой предварительно очищается и просушивается. К камере присоединяется через систему вспомогательной откачки квадрупольный масс-спектрометр. Посредством форвакуумного и диффузионного насосов, в камере создается вакуум.

При наличии дефекта поверхности изделия или паяного шва образуется течь, из-за перепада давлений гелий из КДВ будет попадать в камеру, к которой подключен масс-спектрометр. По масс-спектру можно понять насколько сильна течь и сравнить с эталонной. Для определения эталона создается калибровочная течь (используется гелий), которая допустима и не препятствует нормальной работе КДВ, считывается ее масс-спектр, и в последующих контролях все масс-спектры течей сравниваются с эталоном.

	мбар·л/с	мм.рт.ст.·л/с	Па·м ³ /с	см ³ /с*
мбар·л/с	1	0.75	0.1	0.99
мм.рт.ст.·л/с	1.33	1	0.133	1.32
Па·м ³ /с	10	7.5	1	~10
см ³ /с	1.01	0.76	0.101	1

Рис. 2.6. Таблица перевода основных единиц измерения величины течи

В качестве примера, КДВ можно считать герметичной если величина течи $Q_1 < 7,5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.·л/с. При такой течи в систему попадет 1 см³ постороннего газа в течении 12 суток. Течь воздуха через цилиндрический канал радиуса 0.01 мм имеет величину около $7,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.·л/с.

Течи возникают в системах благодаря различным дефектам используемых материалов или в соединениях между ними:

- некачественная пайка, сварка или склейка;
- поры и трещины в материале, образовавшиеся благодаря механическому стрессу или в процессе изготовления;
- неплотности в соединениях и фланцах;
- так называемые, "холодные" или "горячие" течи, открывающиеся при экстремальных температурах.

В случае постепенного уменьшения давления в камере масс-спектрометра необходимо проводить подачу аргона с применением регулирующих натекателей. Если давление увеличивается, то необходимо частично приоткрыть клапан системы вспомогательной откачки. Проводится выдержка КДВ под давлением. (Рис. 2.6)

Калибровочная течь представляет собой герметичный металлический баллон, с одной стороны которого находится трубка для подсоединения течи к вакуумной камере. (Рис.2.7) Внутри баллона трубка соединяется с проницаемым элементом, который выглядит как шарообразная колба и кварцевого или молибденового стекла. Стенки баллона, трубки и проницаемого элемента образуют замкнутый объем, заполненный гелием. В процессе эксперимента происходит диффузия гелия через стенки колбы проницаемого элемента. Толщина стенки, площадь поверхности проницаемого элемента и давление гелия в баллоне определяют диапазон потоков, необходимых для калибровки.

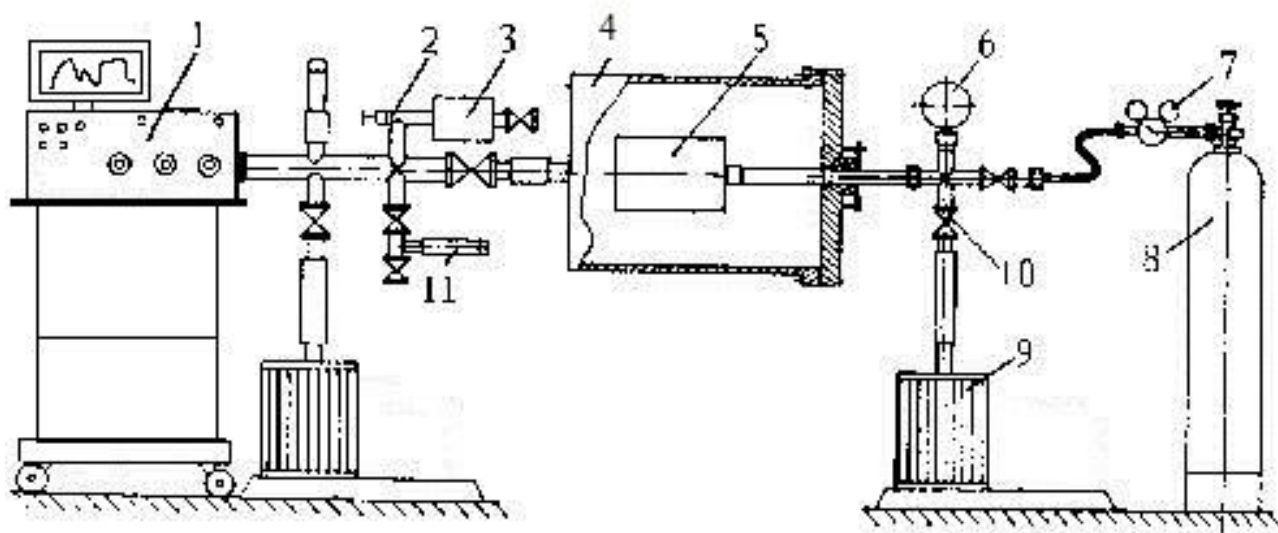


Рис. 2.7. Схема установки для контроля методом вакуумной камеры
1 – квадрупольный масс-спектрометр, 2 – натекатель, 3 – баллон с аргоном, 4 – камера, 5 – КДВ, 6 – мановакууметр, 7 – редуктор, 8 – баллон с гелием, 9 – вакуумный насос, 10 – вакуумный клапан, 11 – калибровочная течь.

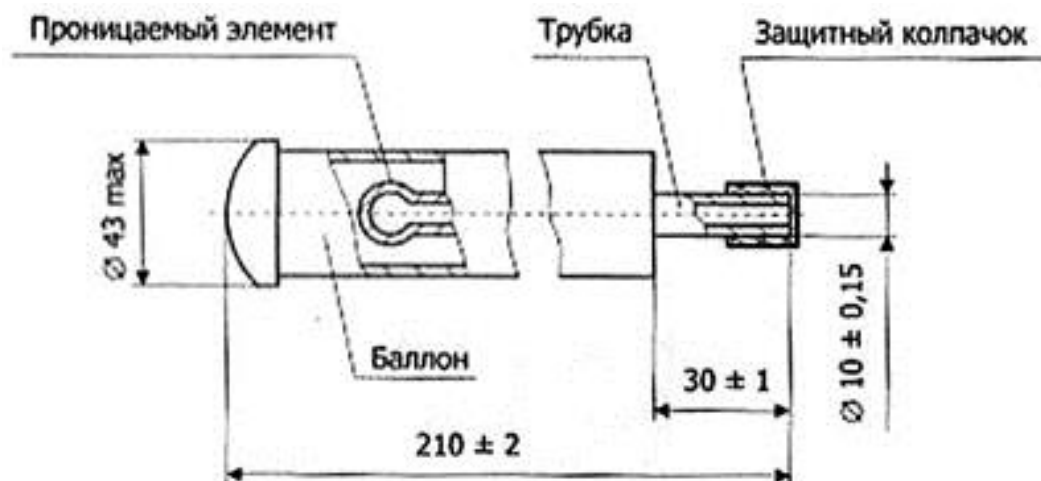


Рис. 2.8. Схема калибровочной течи

Калибровочную течь нужно зарегистрировать на масс-спектрометре, чтобы в дальнейшем по масс-спектру эталонной течи следить за другими и сравнивать пики масс-спектрометра. На рисунке 2.9 видно, что показания гелия минимальны и соответствуют норме вакуумной системы

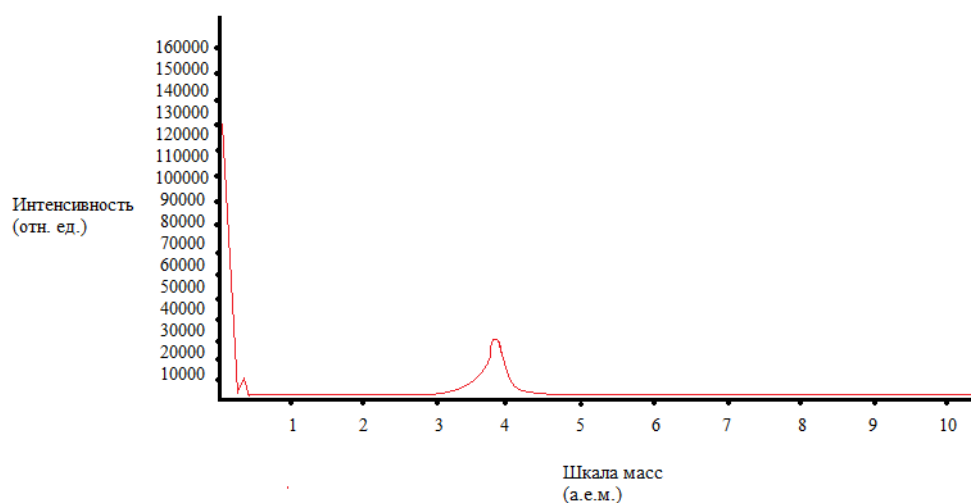


Рис. 2.9. График формирования пиков масс-спектрометра при калибровочной течи

При дефекте вакуумной дугогасительной камере (некачественная пайка, поры или трещины и т.д.) показания на масс-спектрометре изменятся, интенсивность гелия сильно увеличится. (Рис. 2.10)

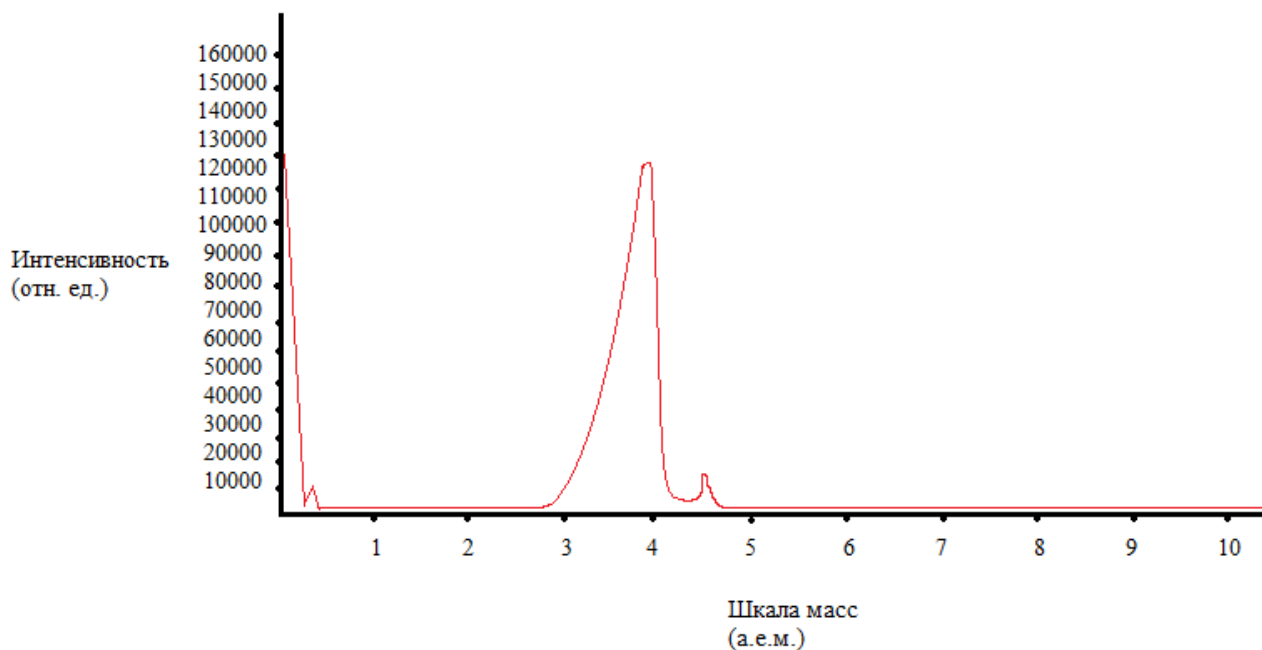


Рис. 2.10. График формирования пиков масс-спектрометра при дефекте КДВ

2.3.5 Анализ вакуумной камеры квадрупольной масс-спектрометрической системой

КДВ в соответствии требованиям подготовки, как уже говорилось, вакуумируется до давления порядка $7,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. Система вспомогательной откачки квадрупольного масс-спектрометра отключается и проводится обдувание гелием наружной поверхности изделия. Эту процедуру следует начинать с мест подсоединения системы вспомогательной откачки к квадрупольному масс-спектрометру, затем зоны пайки, заканчивая полным контролем поверхности камеры. На первой стадии испытаний, нужно установить сильную струю гелия, которая при обдуве охватывает большую площадь. При обнаружении течи необходимо уменьшить струю гелия так, чтобы она слегка чувствовалась при поднесении, и точно определить место сквозного дефекта. Скорость перемещения обдувателя по поверхности составляет 0.10 – 0.15 м/мин.

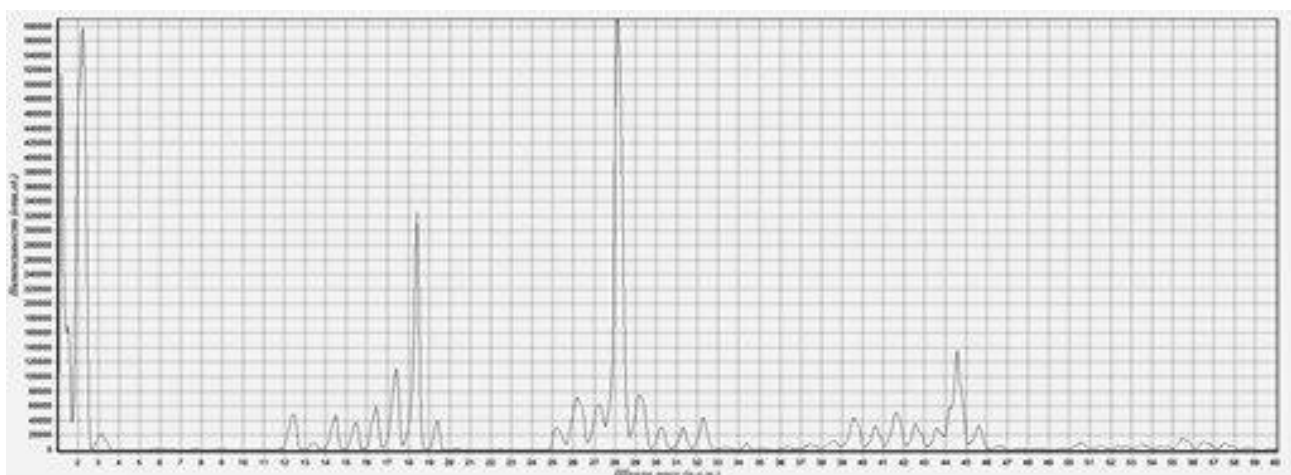


Рис. 2.11. Спектр вакуумной камеры после прогрева до температуры $T=1050\text{ }^{\circ}\text{C}$. Потенциал ионизатора - 70 В

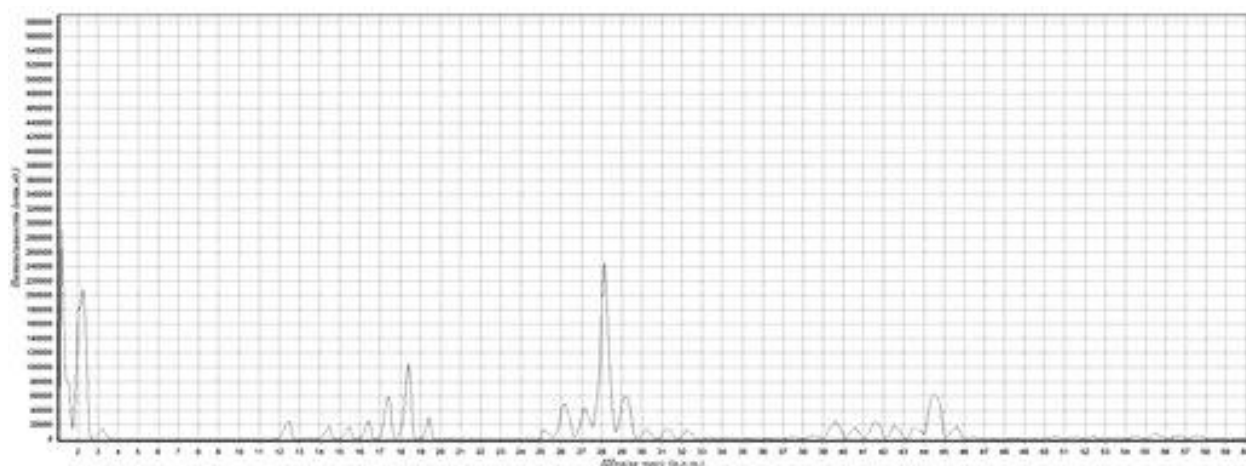


Рис. 2.12. Спектр вакуумной камеры после прогрева до температуры $T=1050\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Потенциал ионизатора - 30 В

В спектрах (рис. 2.11 и 2.12) имеются как ионные линии технологических газов (водород и гелий), так и линии, соответствующие диффузионным маслам типа C_xH_y^+ и молекулы десорбируемые со всех деталей прерывателя, а также ионы остаточного газа (CO_2^+ , H_2O^+ , N_2^+ , N^+ и их многоатомные композиции). Большая массовая доля водорода объясняется технологическим циклом производства камер, в частности, пайки и отжига в водородной печи. На протяжении всего процесса пайки и отжига в среде водорода осуществляет обезгаживание металлов и очистку от поверхностных окислов. Режиму

непосредственной пайки предшествуют два режима выдержки приборов в атмосфере водорода при температуре 700 °С в течение 10 мин. и при температуре 750 °С в течение 15 мин.

После выдержки приборов (КДВ) в водородной печи при температуре 810 °С в течение 5 мин. изделие нагревается далее до температуры около 815 °С (температуры плавления припоя). После того как металлокерамические узлы дугогасительной камеры спаяны, устанавливается режим, направленный на постепенное охлаждение изделия:

- из печи отключается подача водорода и включается подача азота при давлении 1 атм;
- осуществляется снижение температуры печи сначала до 400 °С, а затем до 350 °С в течение 10 мин.;
- при снижении температуры печи до 400 °С ÷ 350 °С и выдержке в течение 10 мин.

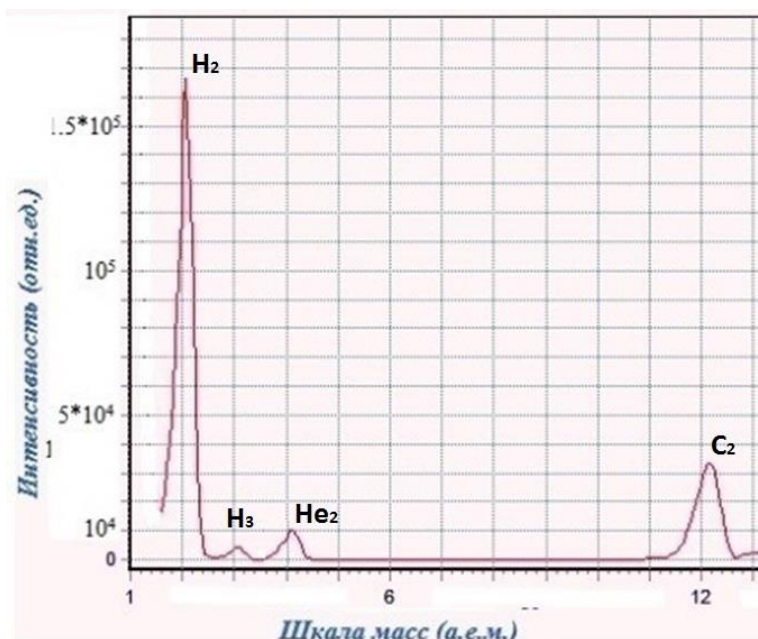


Рис. 2.13. Спектр Н и Не

После тестирования герметичности устройств были обнаружены молекулы остаточного гелия разной энергией в рабочей системе.

Квадрупольная система позволяет выявить различные энергетические состояния He^+ в пространстве камеры и адсорбированные на поверхности по форме линии. Кроме того, система обнаружила молекулы H_3^+ в остаточной атмосфере. Последние результаты оказались неожиданными, поскольку обычно наблюдались в особом состоянии вакуумной дуги при увеличении тока и давления [90]. Наблюдались также изменения состава газа в процессе дегазации и пайки (разогрев до 815 °C).

На этих этапах технологических процессов линии водорода и воды уменьшались, а линии оксидов углерода и азота увеличивались. При этом в установившемся режиме пайки все линии масс-спектра обнаруживают рост, что, вероятно, связано с интенсивным выделением газа из жидкой фазы и разрушением связей хемосорбированных состояний.

2.3.6 Испытание на вакуумную плотность

Основным требованием, предъявляемым к спаям или герметичным изделиям, является их вакуумная плотность. Самым удобным способом течеискания является гелиевый течеискатель. Течеискатель позволяет обнаружить течи, пропускающие поток воздуха от 10^{-2} до 10^{-5} л мкм/сек. Более малые течи в герметичных изделиях обнаруживаются методом опрессовывания в среде гелия. Изделие помещается в герметичную камеру, заполняемую гелием, и измеряется давление остаточного газа через сутки. Этот метод позволяет отбраковать отпаянные изделия, где необходимо длительное сохранение высокого вакуума.

2.4 Особенности и обоснование режимов откачки, обезгаживающего отжига и пайки крупногабаритной камеры КДВ-110

Технологический процесс откачки и обезгаживания КДВ состоит из трех основных этапов: удаление основной массы газа из полости прибора; обезгаживание элементов внутренней части прибора и стенок его оболочки; проведение специальных технологических процессов, направленных на формирование определенной структуры поверхности электродов.

На первом этапе обработки КДВ необходимое разрежение в полости прибора достигается применением соответствующих средств откачки в вакуумных печах форвакуумными насосами, насосом Рутса и диффузионными.

Необходимость проведения второго этапа обработки связана с тем, что материалы, из которых изготовлены оболочка прибора и его внутренняя арматура, содержат значительное количество газа.

При недостаточном обезгаживании прибора, растворимый в материале газ выделяется во время работы и хранения изделия.

Третий этап подробно разобран в третьей главе диссертации.

Комплекс технической очистки деталей и прибора, включающий метод химической и термической очистки реализован при организации производственных процессов, включающих не только операции очистки, но и очистку в условиях чистого производства, подготовки, хранения и сборки деталей, узлов, приборов с использованием шлюзовых камер, защитной атмосферы, чистых зон, чистых комнат, сквозного постоянного пооперационного контроля чистоты свариваемых деталей, непрерывного контроля герметичности свариваемых узлов и приборов.

КДВ-110 имеют достаточно сложное конструктивное исполнение, основу которых составляют: токопроводящий узел, набор защитных экранов и керамический корпус.

Приведенный на рисунке 2.14 токопроводящий узел (блок) прибора КДВ – 110 представляет из себя набор металлических элементов из различных материалов: медь, нержавеющая сталь, сплав Cu-Cr.

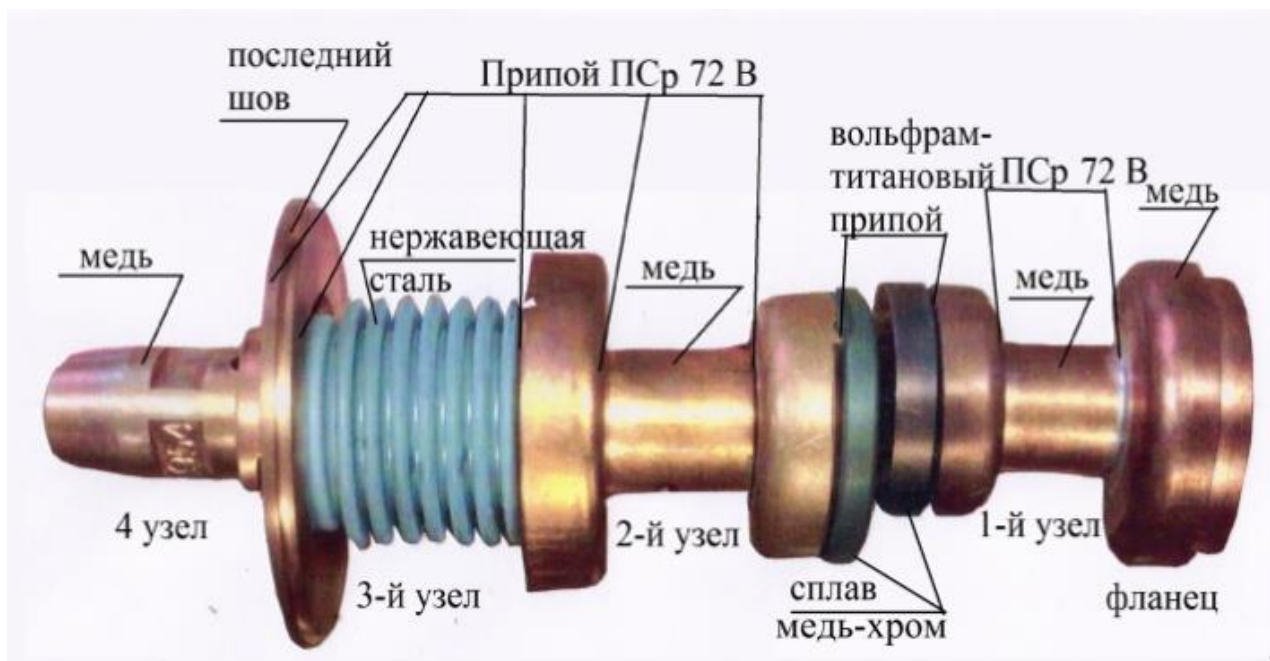


Рис. 2.14. Схема сборочной конструкции токопроводящего узла (блока) металлокерамической КДВ

Применение сплава Cu-Cr, полученного методом порошковой металлургии, в высоковольтных КДВ обеспечивает наилучшие условия образования вакуумной дуги на поверхности электродов и надежность приборов [14].

Токопроводящий блок состоит из отдельных, собранных в результате последовательной пайки узлов: 1-й узел представляет из себя блок крепления электрода, имеющего специальную вогнутую форму (рисунок 2.15 а), из сплава Cu-Cr; узел 2 – ответная часть блока крепления электрода из сплава Cu-Cr; 3-й узел – зона крепления токопроводящего блока с подвижной сильфонной частью камеры; 4-й узел – место крепление камеры к коммутационной аппаратуре (рисунок 2.15 б).



Рис. 2.15. Узлы крепления электрода из сплава (Cu-Cr): а) 1-й узел на рисунок 1.5; б) крепление камеры КДВ к коммутационной аппаратуре (4-й узел на рисунок 2.14)

В камере КДВ–110, помещенной в вакуумную печь типа «Schment», бесштенгальная откачка происходит через щелевые отверстия не запаянных швов. Снижение давления внутри КВД происходит медленно, так как проводимость этих отверстий при молекулярном режиме течения газа мала, а количество газа, находящегося во внутреннем объеме камеры, велико. Если часть процессов связано с нагревом печи, то газовыделение приводит к дополнительному замедлению процесса снижения давления газа внутри КДВ. При подъеме температуры выше 100 °С может начаться процесс окисления деталей внутри КДВ-110.

Проведена оценка времени снижения давления газа в КДВ от атмосферного до уровня $7,5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Уровень $7,5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. выбран в связи с тем, что при этом давлении газа из-за низкой концентрации кислорода не происходит окисление меди и хрома и может производиться нагрев прибора

до температуры плавления припоя. Установлено, что давление остаточного газа в самой вакуумной печи составляет $3,75 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

Изменение давления внутри КДВ описывается уравнением:

$$V \frac{dP}{dt} = U(P - P_n), \quad (2.2)$$

где P - давление в КДВ; P_n - давление в печи; V - внутренний объем КДВ; U - проводимость щелей между собранными узлами КДВ; t - время.

Решение данного уравнения выглядит следующим образом:

$$t - t_0 = \frac{V}{U} \ln \frac{P_0 - P_n}{P - P_n}, \quad (2.3)$$

где P_0 - начальное давление внутри КДВ в момент времени t_0 .

Проводимость отверстий и каналов в вакууме существенно зависит от режима течения газа. При молекулярном режиме течения газа проводимость в (10-100) раз меньше, чем при вязкостном и турбулентном режимах.

Молекулярный режим течения возникает, когда длина свободного пробега молекул газа становится соизмеримой с размерами сечения канала. Молекулярный режим течения наступает при выполнении следующего соотношения [63].

$$P_{cp} r \leq 0.02 \text{ [Па} \cdot \text{м]}, \quad (2.4)$$

где r – радиус цилиндрической щели; P_{cp} - среднее давление газа (воздух) в щели.

При $b = 10^{-4}$ м (0,1 мм), находим, что

$$P_{cp} \leq \frac{0.02}{10^{-4}} \leq 2 \cdot 10^2 \text{ Па}, \quad (2.5)$$

При данной величине среднего давления в щели P_{cp} наступает молекулярный режим течения газа, который характеризуется резким снижением проводимости щели и, следовательно, скорости откачки газа из внутреннего объема камеры. Давление в камере - $P = 2P_{cp} = 4 \cdot 10^2 \text{ Па} \sim 3 \text{ мм рт. ст.}$ Нужно считать величиной порогового значения давления P_0 , т.е. $P_0 = 4 \cdot 10^2 \text{ Па}$ (3 мм рт. ст.).

Проводимость щелевого канала в молекулярном режиме определяется формулой [63]:

Проводимость щелевого канала в молекулярном режиме определяется следующим соотношением [5]:

$$U = 116 \frac{ab^2}{l} \ln \frac{l}{b} \left[\frac{m^3}{c} \right] (b \ll a), \quad (2.6)$$

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

Время снижения давления остаточного газа (воздуха) внутри КДВ в результате истечения через щель между собранными узлами от начального значения $P_0 = 4 \cdot 10^2 \text{ Па}$ (3 мм рт. ст.) до конечного $P = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ ($7,5 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$) можно рассчитать по формуле [13]:

$$t = \frac{V}{U} \ln \frac{P_0 - P_n}{P - P_n}, \quad (2.7)$$

где V – внутренний объем камеры.

Полагая $a = b = 10^{-4} \text{ м}$; $l = 0,1 \text{ см}$ и $V = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$, получаем $t = 14-15 \text{ мин.}$

Очевидно, чем больше высота щели между узлами, тем быстрее будет происходить откачка внутреннего объема КДВ. Увеличение высоты щели приводит к снижению вероятности получения герметичного шва и неточному соединению. Оптимальная величина зазора между узлами для откачки внутреннего объема КДВ составляет 0,1 - 0,15 мм. При этом время, необходимое для откачки газа из объема КДВ, должно составлять от 15 до 45 минут.

При расчете времени откачки не учитывается газовыделение с поверхностей деталей КДВ. После откачки основного количества газа из объема КДВ поток газовыделения с поверхности внутренних деталей становится основным фактором, определяющим величину давления внутри камеры. Скорость газовыделения зависит от температуры нагрева и времени обезгаживания. Поэтому в течение времени, когда происходит удаление газа из объема КДВ, температура нагрева должна быть ограничена. Как отмечалось выше, она не должна превышать 100 °С. При более высокой температуре значительно возрастает скорость газовыделения и возможно окисление поверхностей деталей из меди и хрома. Завершение операции откачки газа из объема КДВ является стартом (началом) подъема температуры печи до значения, при котором будет проводиться обезгаживание, прибора до величины, при которой давление внутри КДВ не превышает 10^{-2} Па.

Давление P внутри КДВ будет определяться по известной формуле:

$$P = \frac{Q}{U}, \quad (2.8)$$

где Q - суммарный поток газовыделения с внутренних деталей КДВ; U - проводимость щелей между узлами КДВ.

При резком подъеме температуры и росте газовыделения давление внутри КДВ будет зависеть от проводимости щелей. График подъема температуры подбирается исходя из требований, технических условий и размеров КДВ, чистоты подготовки деталей перед сборкой, величиной загрузки печи и других факторов на основании опыта зарубежных производителей. Остальные операции: выдержка для обезгаживания, кратковременный нагрев до температуры плавления второго припоя, снятие нагрева, герметизация швов, остывание печи - выполняются традиционным образом.

Предлагаемый способ откачки и герметизации КДВ в вакуумной печи с использованием дополнительной операции - выдержки с длительностью, достаточной для откачки газа из объема камер через незапаянные швы при температуре не более 100 °С, позволяет применять бесштенгельную технологию откачки для изготовления КДВ большого размера (на напряжение 110 кВ). Повышается также и производительность, так как возможна групповая обработка камер и совмещение операций сборки, откачки и герметизации [61].

Сложность технологической цепочки сборки металлокерамических дугогасительных камер связана с наличием мест крепления защитных экранов.

На механическую прочность паяного соединения влияет зазор между паяемыми деталями, величина которого определяет толщину слоя припоя в шве. Зазор должен легко заполняться припоем и удерживать его благодаря капиллярному натяжению. Оптимальный размер зазора зависит от свойств припоя и состояния поверхности соединяемых деталей. При отклонении размеров зазора от оптимальной величины прочность паяных соединений уменьшается.

Пайка в печах позволяет уменьшить деформацию спаиваемых деталей и паять сразу несколько швов. Процесс ведется в следующей последовательности: детали сборочной единицы ВДК собираются на оправках, их взаимно фиксируют приспособлениями из нержавеющей стали X18H9T,

чтобы избежать припаивания приспособлений к деталям. Припой накладывается на места пайки в виде проволоки диаметром 0,3—1,2 мм, после чего сборка изделия помещается в печь, температура которой повышается до температуры обезгаживания (температура обезгаживания ограничивается испарением материала - испарение считается заметным, если давление паров над металлом превышает 10^{-2} мм рт. ст.; максимальная температура обезгаживания для меди таким образом - 500 °C).

Условием установившегося режима откачки является равенство

$$S_p = S_q \quad (2.9)$$

где $S_q = Q / P_{\text{раб.}}$ - быстрота газовыделения, то есть объем газа, выделяющийся в единицу времени со всех поверхностей, обращенных в вакуумную полость; $P_{\text{раб.}}$ - рабочее давление; S_p - быстродействие (скорость откачки) вакуумного насоса при давлении $P_{\text{раб.}}$.

Быстроту откачки S_p можно определить из соотношения

$$S_p = S_n \left(1 - \frac{P_{\text{пред.}}}{P_{\text{раб.}}}\right) \quad (2.10)$$

где S_n - максимальное (паспортное) значение быстроты откачки высоковакуумного насоса (агрегата), м³/с (л/с); $P_{\text{пред.}}$ - предельное (минимальное) давление газа, поддерживаемое в сечении впускного патрубка вакуумного насоса, Па; $P_{\text{раб.}}$ - рабочий вакуум, задаваемый условиями технологического процесса.

Приравняв значения S_p и S_q находим искомое расчетное значение быстродействия или скорости откачки высоковакуумного насоса

$$S_{n(\text{расч.})} = \frac{Q}{P_{\text{раб.}} - P_{\text{пред.}}} \quad (2.11)$$

Время обезгаживающего отжига зависит от размеров и веса сборочной единицы. Если вес сборочной единицы не превышает 1 кг, то время выдержки составляет 7-12 мин; при весе 1-3 кг время выдержки 12-20 мин и т.д.

Расчетный вес КДВ-110 (25 кг) и габариты (диаметр 200 - 250 мм и длина 800 - 1200 мм), учитывая это, получим время выдержки 70 мин, что было подтверждено на практике (отсутствие прироста давления внутри печи за счет газовой выделений с поверхности изделий).

Время плавления припоя определяется по формуле

$$t \geq 2,3h^2/\pi^2D \quad (2.12)$$

где t — время, сек; h — величина зазора, см; D — коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{сек}$ (при $1000^\circ\text{C} = 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$). С учетом габаритов ВДК-110 и количества использованного припоя, подставив значения, получим время 2-3 минуты (для первого и второго припоя).

Остывание изделия до 100°C ведется в защитно-восстановительной среде газа в течении 50 мин. После чего происходит нормализация давления внутри печи и остывание продолжается в воздушной среде.

Теоретический расчет режима откачки КДВ-110 с учетом пайки и обезгаживающего отжига подтвердился на производстве экспериментально (в частности, время, так как температуры являются табличными значениями) и представлен на рисунке 2.16. На нем указаны: T_o — температура обезгаживания; $T_{пл1}$ — температура плавления первого припоя; $T_{пл2}$ — температура плавления второго (высокотемпературного) припоя; t_1 — время откачки объема печи (необходимое для достижения давления $3,75 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.); $t_2 - t_1$ — время нагрева до температуры обезгаживания (зависит от мощности нагревательной системы); $t_3 - t_2$ — время выдержки при температуре обезгаживания; $t_4 - t_3$ — время нагрева и выдержки при температуре плавления первого припоя (дополнительно фиксировалось по плавлению «контрольки» из припоя вне объема КДВ); $t_5 - t_4$ — время нагрева и выдержки при температуре плавления второго (высокотемпературного) припоя (дополнительно фиксировалось по плавлению «контрольки» из припоя вне объема КДВ); $t_6 - t_5$ — время остывания

печи до комнатной температуры (зависит от мощности системы газового охлаждения печи).

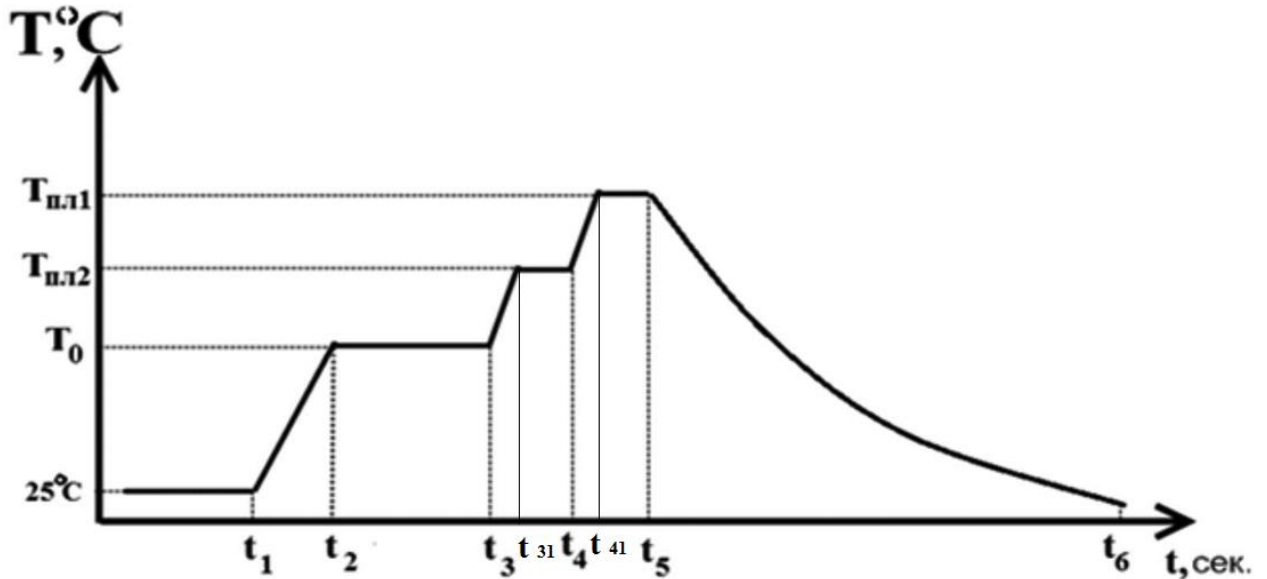


Рис. 2.16. Общий температурный график производства ВДК

Реализация такого режима пайки оказалась возможна благодаря встроенным в вакуумную и водородную печи датчикам температуры, способным контролировать каждый участок 3D внутреннего объема прибора, и давления, совмещенным с компьютером.

Данный режим пайки может быть представлен теоретической моделью, описывающей тепловые процессы, происходящие при нагревании и теплообмене различных материалов и сильфонов при нестационарном режиме пайки (плавление, остывание и формирование поверхности точечных и протяженных швов) металлокерамических узлов и изделий. Распространение теплоты при нестационарном тепловом режиме можно описать дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (2.13)$$

где $a = \lambda / (c_m \cdot \rho)$ – коэффициент теплопроводности; λ – коэффициент теплопроводности материала; ρ – плотность материала; τ – время нагрева; x, y, z – координаты распространения теплоты.

Учитывая начальные и граничные условия, переходим к виду критериальных зависимостей типа:

$$\Theta = f(Bi, Fo, L), \quad (2.14)$$

где $\Theta = (t_c - t) / (t_c - t_0)$ – безразмерная температура; t_c – температура среды; t_0, t – начальная и текущая температуры материала; $L = x / \delta$ – безразмерная координата; δ – габариты (толщина) материала.

Основными критериями, входящими в состав решений уравнения теплопроводности, являются критерий Фурье (Fo), характеризующий свойства тела в отношении его нагрева и являющийся относительным временем нагрева

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{\delta^2}, \quad (2.15)$$

и критерий Био (Bi), характеризующий условия теплообмена на поверхности или отношение теплоотдачи с поверхности тела (α) к интенсивности притока теплоты изнутри тела (λ / δ)

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda}. \quad (2.16)$$

Если $Bi \ll 1$ – теплоотдача с поверхности тела мала (велика проводимость материала). Если $Bi \gg 1$ – температура поверхности тела практически равна температуре окружающей среды.

Для тел большого объема (камера КДВ-110) $Bi > 0,25$. При нагреве термически массивных тел распределение температуры по толщине материала

неравномерное - $dt/dx \neq 0$; в результате чего наблюдаются термические напряжения, способные в дальнейшем привести к деформации или разрушению изделия. Расчет количества тепла (конвективного теплообмена), получаемого (отдаваемого) телом при конвективном теплообмене, определяется по закону Ньютона:

$$Q = \alpha \cdot (T_c - T_{\text{ж}}) \cdot F \cdot \tau \quad (2.17)$$

где T_c – температура поверхности тела; $T_{\text{ж}}$ – температура окружающей среды; F – площадь поверхности теплообмена; τ – продолжительность процесса; α – коэффициент теплоотдачи конвекцией.

Как правило, все величины известны, кроме коэффициента теплоотдачи α . Коэффициент теплоотдачи конвекцией или аналогичный ему безразмерный коэффициент $Nu = (\alpha \cdot l / \lambda)$ определяется по эмпирическим формулам типа:

при свободной конвекции

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (2.18)$$

при вынужденной конвекции

$$Nu = c \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (2.19)$$

где c, m, n – постоянные; Gr – критерий Грасгофа; Re – критерий Рейнольдса, Pr – критерий Прандтля.

Нагрев изделия в печи происходит за счет конвективного теплообмена. На рисунке 2.17 схематически показан подвод теплоты к изделию из окружающей среды (dQ_T) и воспринятой теплоты, описываемой уравнением теплового баланса (dQ_6). На рисунке 2.18 показано изменение температуры

массивного тела во времени на поверхности и в центре (1 – температура в объеме; 2 – температура на поверхности; $t_{\text{ср}}$ – температура среды).

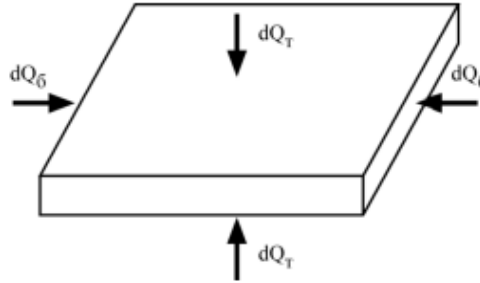


Рис. 2.17. Схема подвода теплоты

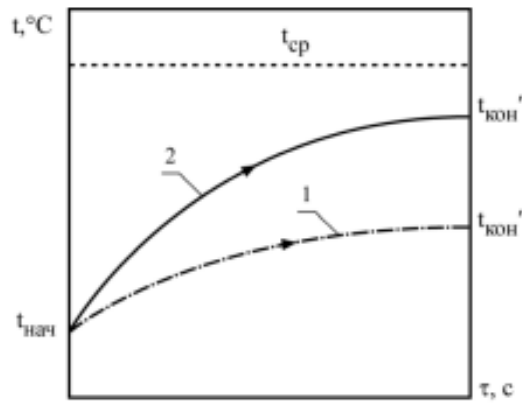


Рис. 2.18. Изменение температуры массивного тела

Для решения задачи распределения термических напряжений в процессе пайки массивного изделия пользуемся уравнениями теплового баланса (dQ_6) и теплообмена (dQ_T)

$$dQ_6 = m C dt$$

$$dQ_T = \alpha F (t_c - t) d\tau \quad (2.20)$$

При достижении условия равенства dQ_6 и dQ_T приходим к уравнению вида:

$$m C dt = \alpha F (t_c - t) d\tau, \quad (2.21)$$

где t_c – температура среды; α – коэффициент конвективной теплоотдачи; t – температура материала; m – масса материала; C – массовая теплоемкость нагреваемого материала.

В уравнении (2.21) разделим переменные величины:

$$\frac{dt}{t_c - t} = \frac{\alpha F}{m C} \cdot d\tau. \quad (2.22)$$

Проинтегрируем уравнение (2.22) и получаем

$$\int_{t_{\text{нач}}}^{t_{\text{кон}}} \frac{dt}{t_c - t} = \frac{\alpha F}{m C} \int_0^{\tau_n} dF. \quad (2.23)$$

После интегрирования имеем

$$\ln \frac{t_c - t_{\text{кон}}}{t_c - t_{\text{нач}}} = \frac{\alpha F}{m C} \tau_n. \quad (2.24)$$

Длительность нагрева заготовок определяется соотношением:

$$\tau_n = \frac{m C}{\alpha F} \ln \frac{t_c - t_{\text{кон}}}{t_c - t_{\text{нач}}}. \quad (2.25)$$

Подставив значения (габариты изделия и параметры материала: масса – 25 кг; теплоемкость – 0,415 кДж/кг·К; коэффициент конвективной теплоотдачи – 50 Вт/м²·К и 30 Вт/м²·К в момент конвекционного остывания ; площадь поверхности – 1,04 м²) в данную формулу (2.25), получаем следующие значения времени для общего температурного графика производства КДВ-110 (рис. 2.16):

Первая значимая точка (t_2) – достижение температуры обезгаживания Cu (500 °С) – время 27,9 минут. Далее происходит процесс обезгаживания ($t_2 - t_3$) самих медных узлов и узлов из нержавеющей стали (рис. 2.14).

$$t_2 = \frac{25 * 0,415}{50 * 1,04} \ln \frac{550 - 500}{550 - 25} = 0,198 * \ln 0,0952 = 0,465 \text{ часа}$$

Вторая значимая точка (t_{31} на рис. 2.16) – достижение температуры плавления первого припоя (824 °C) – время 40,39 минут (полученное из соотношения 2.25). Процесс плавления припоя обозначен интервалом $t_{31} - t_4$ на рис. 2.16 и соответствует соединению узлов 1, 2, 3 и 4 на рис. 2.14).

$$t_{31} = \frac{25 * 0,415}{50 * 1,04} \ln \frac{850 - 824}{850 - 25} = 0,198 * \ln 0,0315 = 0,67 \text{ часа}$$

Третья значимая точка (t_{41} на рис. 2.16) – достижение температуры плавления второго припоя (980 °C) – время 54,3 минут (полученное из соотношения 2.25). Процесс плавления припоя обозначен интервалом $t_{41} - t_5$ на рис. 2.16 (оба узла пайки электродов вольфрам-титановым припоем указаны на рис. 2.14).

$$t_{41} = \frac{25 * 0,415}{50 * 1,04} \ln \frac{990 - 980}{990 - 25} = 0,198 * \ln 0,01036 = 0,9 \text{ часа}$$

Завершающий этап – процесс остывания готового изделия – 88,98 минут ($t_5 - t_6$). Время остывания после пайки получено из соотношения 2.25.

$$t = \frac{25 * 0,415}{30 * 1,04} \ln \frac{990 - 25}{990 - 980} = 0,3325 * \ln 86,5 = 1,45 \text{ часа}$$

2.5 Реализация режимов производства на новом современном оборудовании

2.5.1 Новые режимы пайки

Применение сплава Cu-Cr, полученного методом порошковой металлургии, в высоковольтных КВД обеспечивает наименьшее разрушение поверхности электродов и надежность приборов.

Токопроводящий блок (рисунок 2.14) состоит из отдельных, собранных в результате последовательной пайки узлов. Технология сборки узлов

токопроводящего блока предполагает использование методов химической очистки деталей, изготовленных на металлорежущих, токарных, фрезерных и шлифовальных станках с ЧПУ, методов электрохимической подготовки и очистки изделий (сильфонов) из нержавеющей стали, а также методы термической очистки деталей.

При отжиге деталей в вакууме удаляется не только большая часть абсорбированных газов, но и значительная часть химически связанных газов (в виде окислов, нитратов и др.) в результате химической диссоциации или восстановления газов (CO_2, H_2), которые выделяются из внутренних слоев металла.

Установленные режимы отжига деталей и всего прибора в целом обеспечивают максимальное обезгаживание узлов без ухудшения механических свойств и формоустойчивости деталей.

Обычно температура обезгаживающего отжига паянных узлов ($T_{отж}$) определяется по известному соотношению: $T_{отж} = 0,75 \cdot T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления припоя.

Скорость обезгаживания (вакуумный отжиг) возрастает при увеличении разности парциальных давлений газа в вакуумной установке, в материалах деталей и прибора в целом.

Вакуумная печь «Schment» с молибденовым нагревателем ($T_{\max} = 1200$ °C) имеет значительные размеры вакуумного колпака и вакуумопровод большого диаметра, совмещенный с турбомолекулярным насосом, что обеспечивает групповую бесштенгельную откачку и пайку большого количества приборов (КДВ), высокую скорость откачки, широкие возможности выбора режимов высокотемпературной пайки.

Пайка в вакууме имеет ряд преимуществ перед другими способами соединения деталей. Обеспечивается возможность соединения в единое целое за один прием множества заготовок, составляющих изделия. Пайка помогает

соединять разнородные металлы, а также металлы с керамикой. В процессе пайки не происходит расплавления кромок паяемых деталей, что дает возможность сохранить форму и размеры изделия. Для пайки в вакуумных печах широкое применение получил припой ПСр 72 – сплав эвтектического состава (на основе серебра с содержанием меди или палладия). Такие припои обладают повышенной тепло- и электропроводностью, высокими прочностью, пластичностью и коррозионной стойкостью.

Установлены следующие технологические режимы термической очистки КДВ: время пайки 2 – 3 мин при температурах 980 °С (ПСр-72) и 815 °С (ПСрМПд-68). Данные температуры обеспечивали устойчивую герметизацию узлов прибора. Значение температуры оказалось немного больше справочной температуры плавления (910 °С и 779 °С) для данных припоев. Температурный и временной технологический режим пайки выбирался опытным путем. Критерием качества является хорошее качество пайки и шва; определено время обезгаживающего отжига оболочки, деталей и изделия: 25 – 30 мин при температуре 500 °С.

В работе пайка осуществлялась в итальянской водородной печи «Farnet» с компьютерной системой управления режимами поддержания температуры и давления по сечению и вертикали в печи, обеспечивая контроль и наглядность технологического процесса изготовления КДВ-110 (рис. 2.19), а так же возможность 3D выбора и управления режимами пайки.

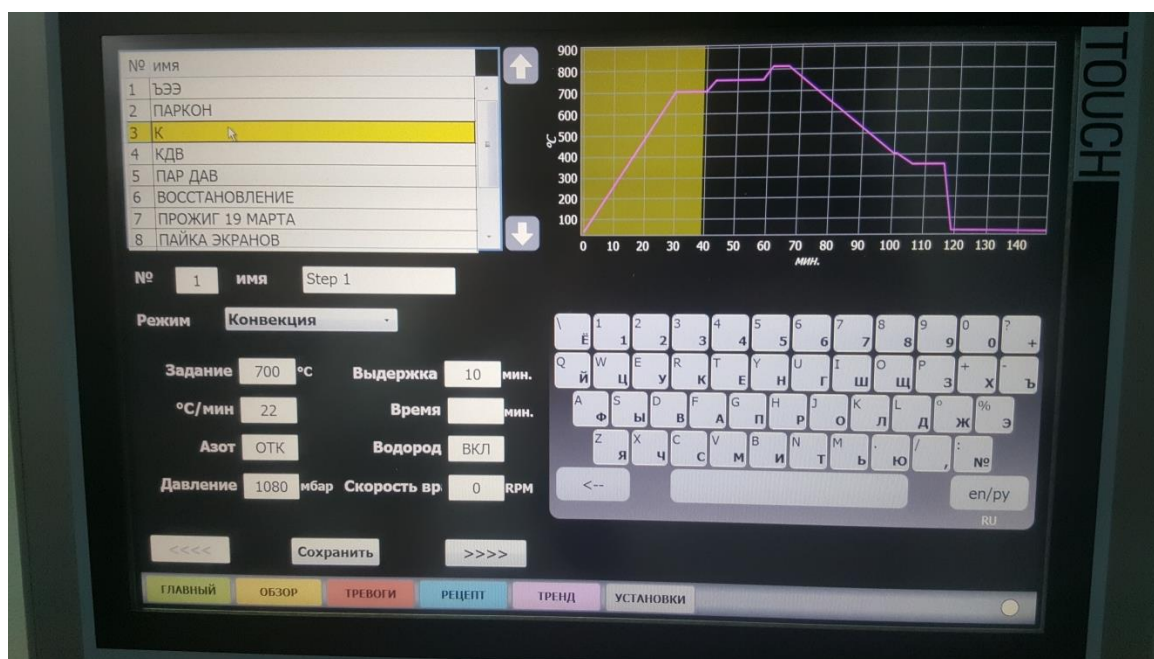


Рис. 2.19. Наглядное изображение режима пайки (1 шаг)

Таблица 2.1.

I этап режима пайки

Конвекция			
Задание	700	Выдержка	10
Скорость	22	Время	
N	ОТК	Н	ВКЛ
Давление	1080	Ск. вент	
Расход газа			
Азот	Бар	1,21	
	м³/ч	0	
Водород	Бар	0,34	
	м³/ч	0,2	
Температура		до	после
	Основная	700	700
	Низ	584	
	Верх	638	
Вода	Корпус	23	23
	Дно	20	20
Примечание	За 4 мин. до конца выдержки 2 термопара достигла 700 °С. Дав ~0,5 мрт		

В таблице 2.1 показан вакуумный тест (1080 Па), распределение температуры по сечению (23; 584; 638; 700 °С), малый расход газа (водорода 0,2

м³/ч и азота 1,21 м³/ч), температура водяного охлаждения (20-23 °С) и время выдержки (10 мин.).

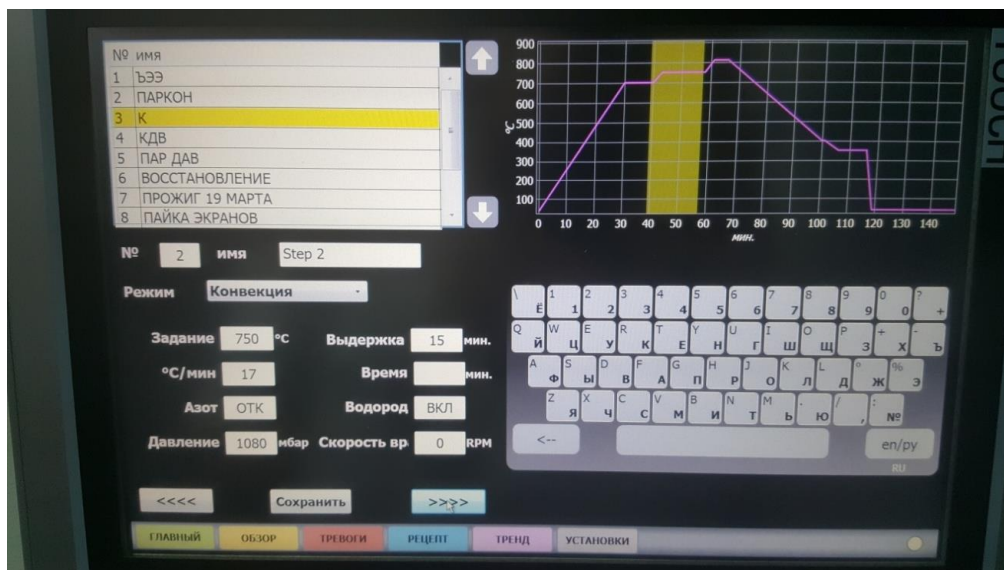


Рис. 2.20. Наглядное изображение режима пайки (2 шаг)

Таблица 2.2.

II этап режима пайки

Конвекция			
Задание	750	Выдержка	15
Скорость	17	Время	
N	ОТК	Н	ВКЛ
Давление	1080	Ск. вент	
Расход газа			
Азот	Бар	1,21	
	м ³ /ч	0	
Водород	Бар	0,34	
	м ³ /ч	0,19	
Температура		до	после
	Основная	750	750
	Низ	713	740
	Верх	741	766
Вода	Корпус	26	29
	Дно	20	20

В таблице 2.2 приведено постепенное повышение температуры по сечению (26; 713; 741; 750 °C), расход газа (водорода и азота), температура водяного охлаждения и время выдержки (15 мин.).

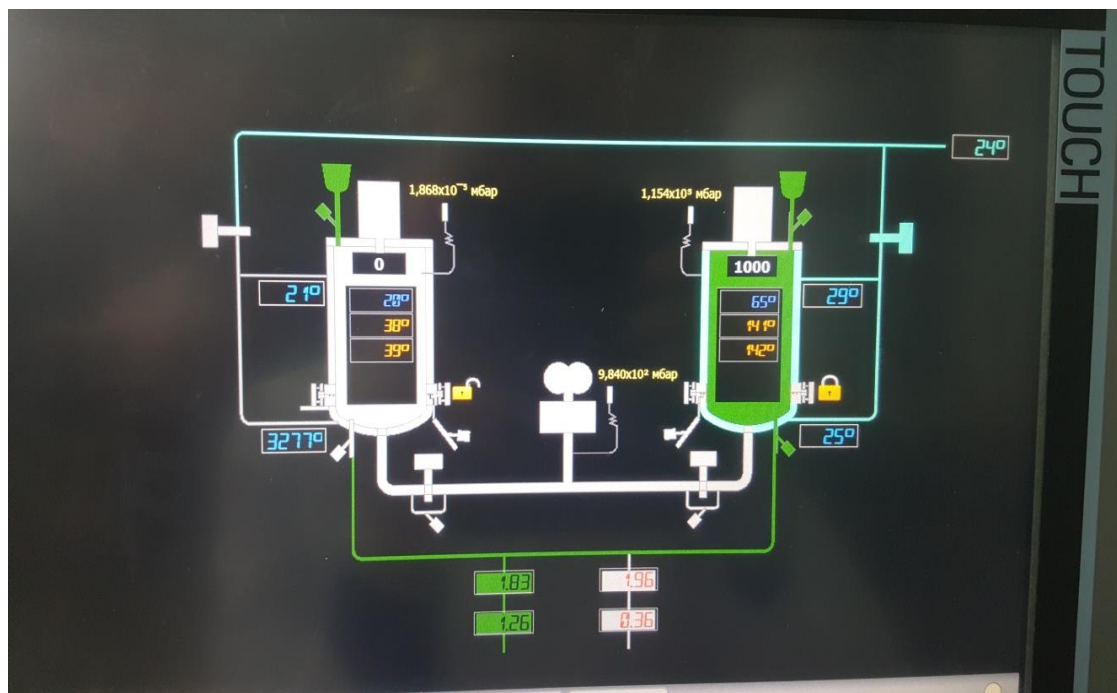


Рис. 2.21. Обзор напуска азота N₂

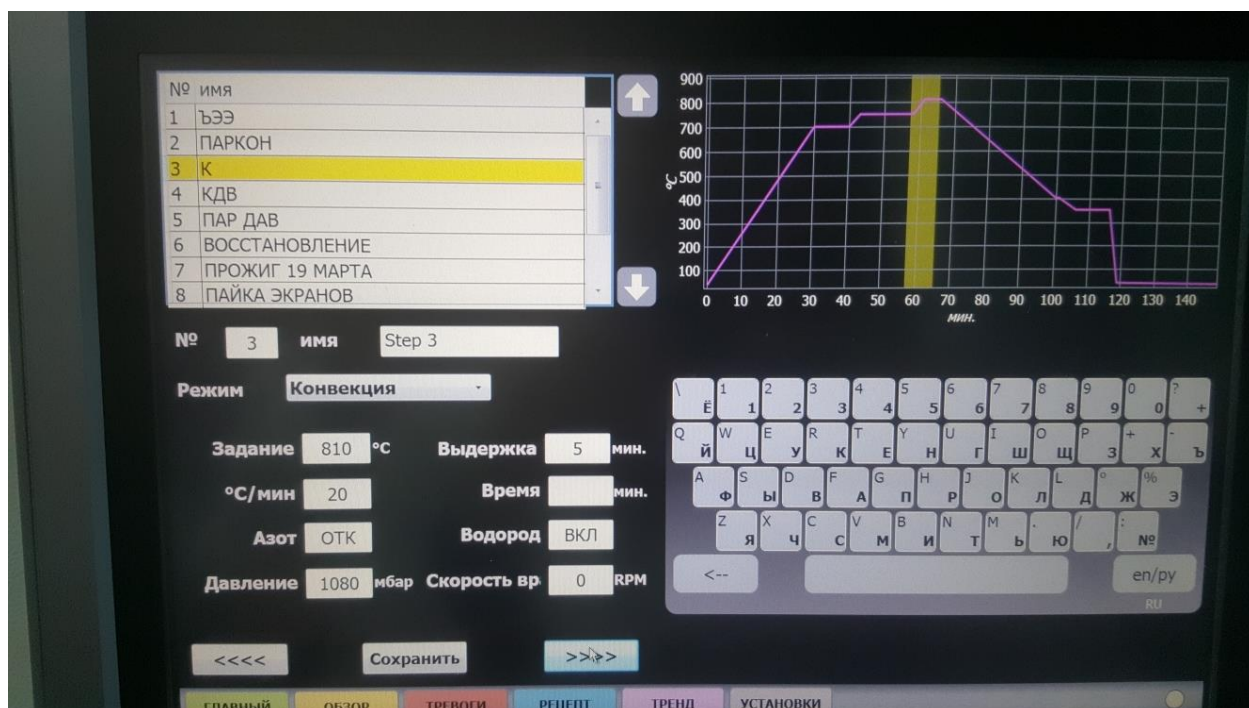


Рис. 2.22. Наглядное изображение режима пайки (3 шаг)

В таблице 2.3 показано на сохранение на всех этапах давления в камере (1080 Па), распределение температуры по сечению (21; 30; 799; 768; 810 °С) до и после пайки (21; 31; 824; 794; 810 °С), расход газа (водорода и азота), температура водяного охлаждения и время выдержки (5 мин.).

Таблица 2.3.

III этап режима пайки

Конвекция			
Задание	810	Выдержка	5
Скорость	20	Время	
N	ОТК	N	ВКЛ
Давление	1080	Ск. вент	
Расход газа			
Азот	<i>Бар</i>	1,2	
	<i>м³/ч</i>	0	
Водород	<i>Бар</i>	0,34	
	<i>м³/ч</i>	0,15	
Температура		<i>до</i>	<i>после</i>
	<i>Основная</i>	810	810
	<i>Низ</i>	768	794
	<i>Верх</i>	799	824
Вода	<i>Корпус</i>	30	31
	<i>Дно</i>	21	21
Примечание	На манометре увеличение с 0,5 до 0,8		

По окончании выдержки (таблица 2.3), происходит повышение температуру до температуры плавления припоя. Для отслеживания пайки, устанавливается «контролька», из заложенного припоя. Камера с «контролькой» устанавливается на уровне просматриваемого окна печи для удобства контроля за данным процессом.

После того, как завершен процесс спайки камер (таблица 2.4), устанавливается режим, направленный на постепенное охлаждение изделий.

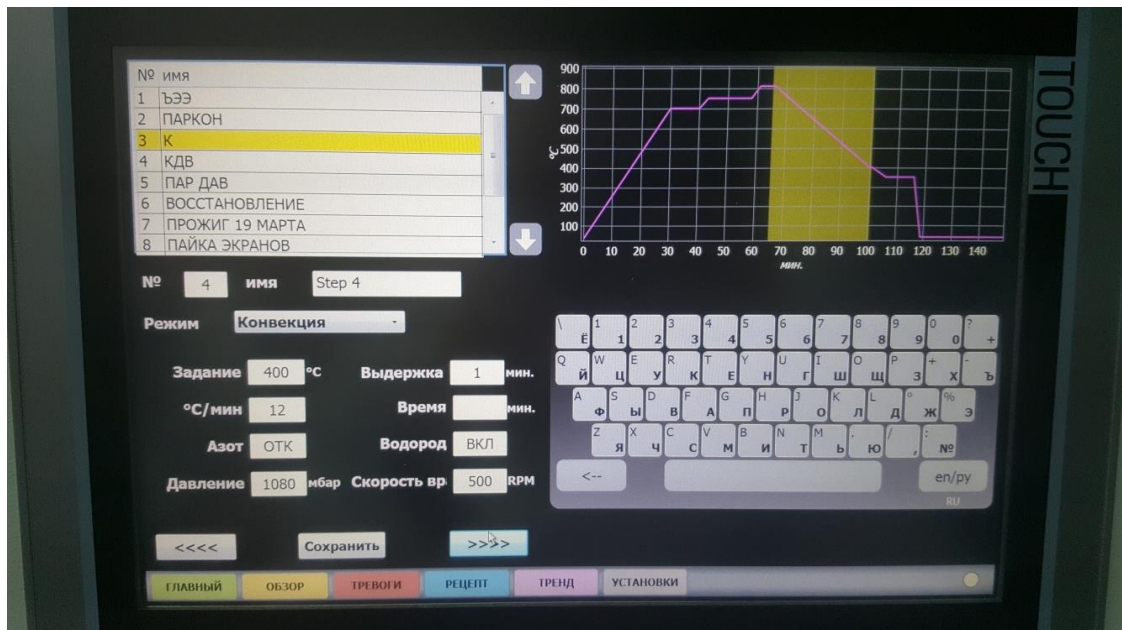


Рис. 2.23. Наглядное изображение режима пайки (4 шаг)

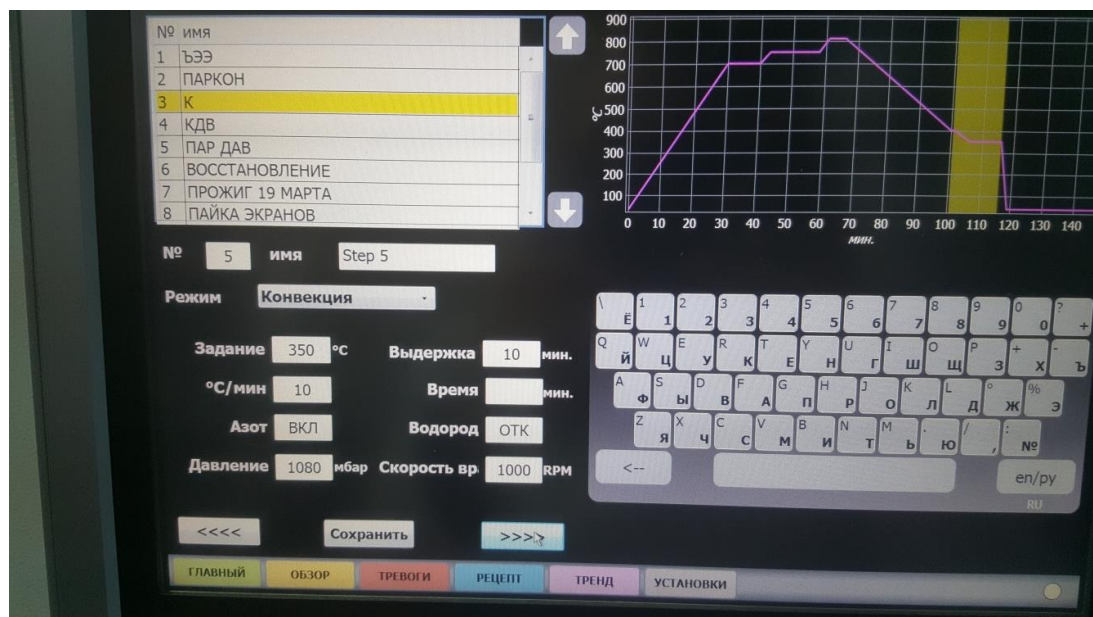


Рис. 2.24. Наглядное изображение режима пайки (5 шаг)

В таблице 2.4 приведены: тест давления в камере (1080 Па), распределение температуры по сечению до пайки (23; 32; 545; 481; 400 °C) и после пайки (23; 32; 536; 461; 380 °C), расход газа (водорода и азота), температура водяного охлаждения и время выдержки (1 мин.).

Таблица 2.4.

IV этап режима пайки

Конвекция			
Задание	400	Выдержка	1
Скорость	12	Время	
N	ОТК	Н	ВКЛ
Давление	1080	Ск. вент	500
Расход газа			
Азот	<i>Бар</i>	1,11	
	<i>м³/ч</i>	1,74	
Водород	<i>Бар</i>	0,35	
	<i>м³/ч</i>	1,88	
Температура		<i>до</i>	<i>после</i>
	<i>Основная</i>	400	380
	<i>Низ</i>	481	461
	<i>Верх</i>	545	536
Вода	<i>Корпус</i>	32	32
	<i>Дно</i>	23	23
Примечание			

В таблице 2.5 приведены: тест давления в камере (1080 Па), распределение температуры по сечению до пайки (23; 35; 506; 414; 350 °С) и после пайки (24; 35; 498; 398; 347 °С), самый большой расход газа (водорода 1,84 м³/ч и азота 1,43 м³/ч), температура водяного охлаждения и время выдержки (10 мин.).

Таблица 2.5.

V этап режима пайки

Конвекция			
Задание	350	Выдержка	10
Скорость	10	Время	
N	ОТК	Н	ВКЛ
Давление	1080	Ск. вент	1000
Расход газа			
Азот	<i>Бар</i>	1,43	
	<i>м³/ч</i>	1,72	
Водород	<i>Бар</i>	0,35	
	<i>м³/ч</i>	1,84	
Температура		<i>до</i>	<i>после</i>
	<i>Основная</i>	350	347
	<i>Низ</i>	414	398
	<i>Верх</i>	506	498
Вода	<i>Корпус</i>	35	35
	<i>Дно</i>	23	24
Примечание			

Все предыдущие этапы осуществлялись с напуском водорода (H₂). На 5 этапе при охлаждении, происходит смена водорода (H₂) на азот (N₂).

Самый последний этап (таблица 2.6) заключается в полном охлаждении камер, с возможностью вытащить их из печи, а также в продувке колпака, которая осуществляется азотом (N₂).

В таблице 2.6 показано радиальное распределение температуры по сечению до пайки (25; 38; 55; 54; 38 °C) и после пайки (27; 38; 55; 54; 38 °C), тоже большой расход газа (водорода 1,87 м³/ч и азота 1,27 м³/ч), температура водяного охлаждения и время выдержки (30 мин.).

Таблица 2.6.

VI этап режима пайки

Продувка			
Задание	40	Выдержка	30
Скорость	103	Время	
N	ОТК	Н	ВКЛ
Давление		Ск. вент	1000
Расход газа			
Азот	Бар	1,27/1,46	
	м ³ /ч	1,76/0,08	
Водород	Бар	0,35/0,36	
	м ³ /ч	1,87/0,08	
Температура		до	после
	Основная	40	38
	Низ	72	54
	Верх	69	55
Вода	Корпус	37	38
	Дно	25	27
Примечание	При 70 ° погасла свеча		

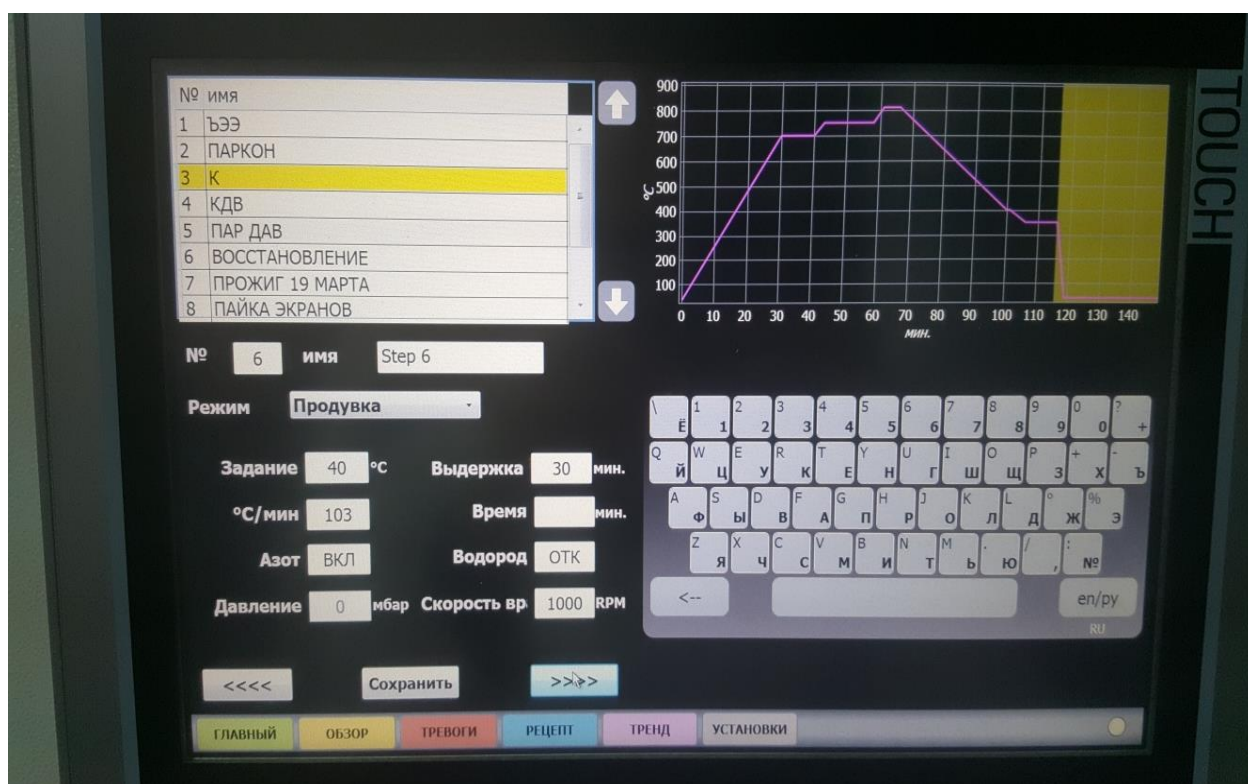


Рис. 2.25. Наглядное изображение режима пайки (6 шаг)

2.5.2 Отжиг в водородных печах

Технология сборки узлов токопроводящего блока предполагает использование методов химической очистки деталей, изготовленных на металлорежущих токарных, фрезерных и шлифовальных станках с ЧПУ, методов электрохимической подготовки и очистки изделий (сильфонов) из нержавеющей стали, а также методы термической очистки деталей.

Отжиг в среде водорода, обезгаживание металлов и очистка от поверхностных окислов осуществлены в двухколпаковой печи «Кристалл», обеспечивающий компьютерные режимы пайки и наглядности технологических процессов, как и в печи «Farnet» (рис. 2.24). При термической обработке снимаются напряжения, возникающие в материалах на механических операциях, детали становятся более формоустойчивыми, улучшаются некоторые свойства металлов. В водороде достаточно удовлетворительно отжигается большинство металлов: вольфрам, молибден, никель, бескислородная медь и их сплавы.



Рис. 2.26. Общий обзор состояния колпаков печи «Кристалл»

При отжиге деталей в вакууме удаляется не только большая часть абсорбированных газов, но и значительная часть химически связанных газов (в виде окислов, нитратов и др.) вследствие химической диссоциации или восстановления газов (CO_2 , H_2), которые выделяются из внутренних слоев металла.

Выбранные режимы отжига деталей и всего прибора в целом обеспечивают максимальное обезгаживание узлов, без ухудшения механических свойств и формоустойчивости деталей.

Обычно температуру обезгаживающего отжига паянных узлов ($T_{\text{отж}}$) определяют из зависимости:

$$T_{\text{отж}} = 0,75 * T_{\text{пл.припоя}}, \quad (2.26)$$

где $T_{\text{пл. припоя}}$ – температура плавления припоя.

Скорость обезгаживания возрастает при увеличении разности парциальных давлений газа в вакуумной установке в материалах деталей и прибора в целом, подвергающихся вакуумному отжигу.

В отличие от отжига в водороде очистка деталей при термической обработке в вакууме основана на диссоциации (разложении) окислов с выделением металла и кислорода, который быстро удаляется из сферы реакции вакуумными насосами; одновременно при взаимодействии окислов с выделяющимися газами происходят восстановительные процессы. В вакууме отжигаются тантал, титан, цирконий и их сплавы, образующие с водородом химические соединения – гидриды, являющиеся причиной хрупкости деталей.

Использование для отжига деталей высокопроизводительной вакуумной печи «Schment» с программным управлением открывает широкие возможности для использования различных режимов термической обработки от температуры охлаждения деталей ($20 - 40^\circ\text{C}$) до 1250°C (температура пайки); позволяет из-за больших размеров печи отжигать габаритные изделия и детали значительных толщин.

2.6 Основные этапы работы на новой высокотемпературной вакуумной печи

Среди основных этапов групповой пайки крупногабаритных КДВ-110 можно выделить следующие: загрузка печи, откачка (производится последовательно в три этапа – форвакуумным насосом, насосом Рутса и диффузионным), нагрев до температуры плавления припоя, пайка, повышение давления, охлаждение, выгрузка готовых элементов.

Процесс группового подвоза и погрузки заготовок крупногабаритных КДВ показан на рис. 2.28.

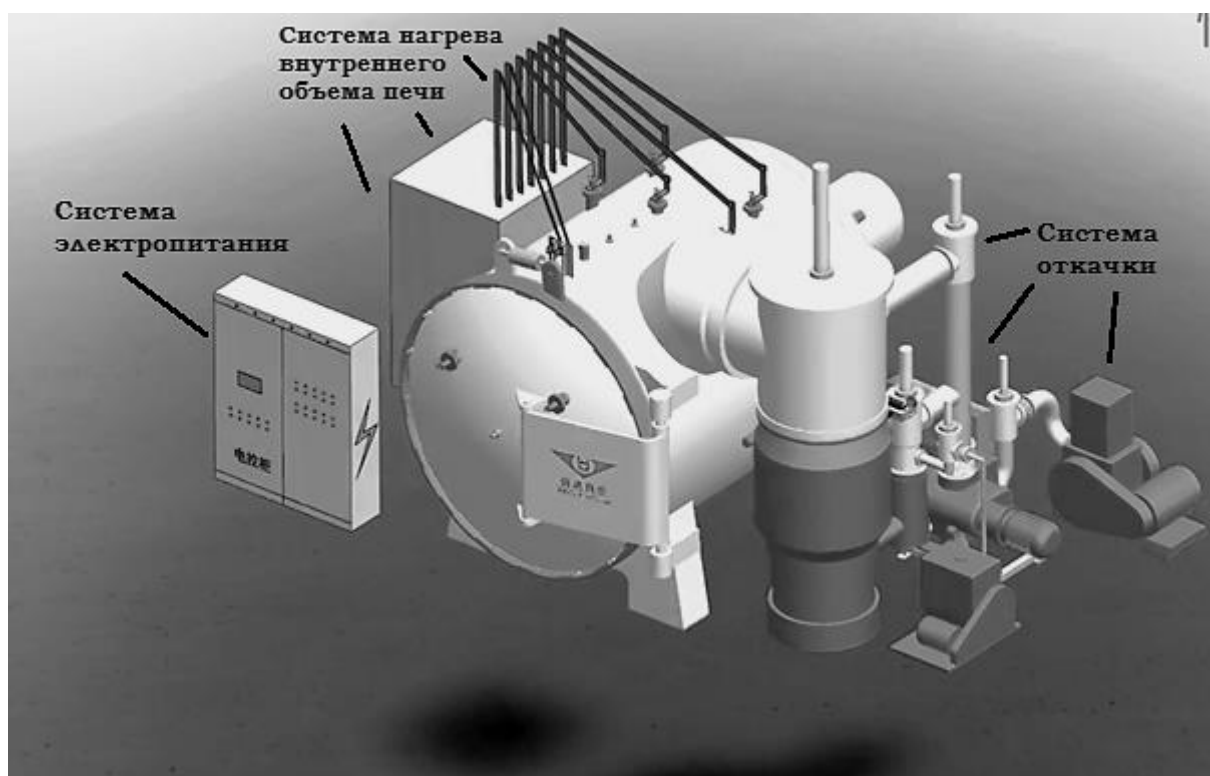


Рис. 2.27. Общий вид вакуумной печи «Schment», систем откачки и питания

После загрузки заготовок (приборов в целом) и закрытия двери в вакуумной печи проводится предварительная откачка атмосферы из объема вакуумной печи форвакуумным насосом до давления 6 мм рт. ст. (рис. 2.28). На этом этапе откачка производится как из печи, так и из остальных насосов при

открытых клапанах 2 и 3. Форвакуумный насос и насос Рутса жестко закреплены между собой последовательно.

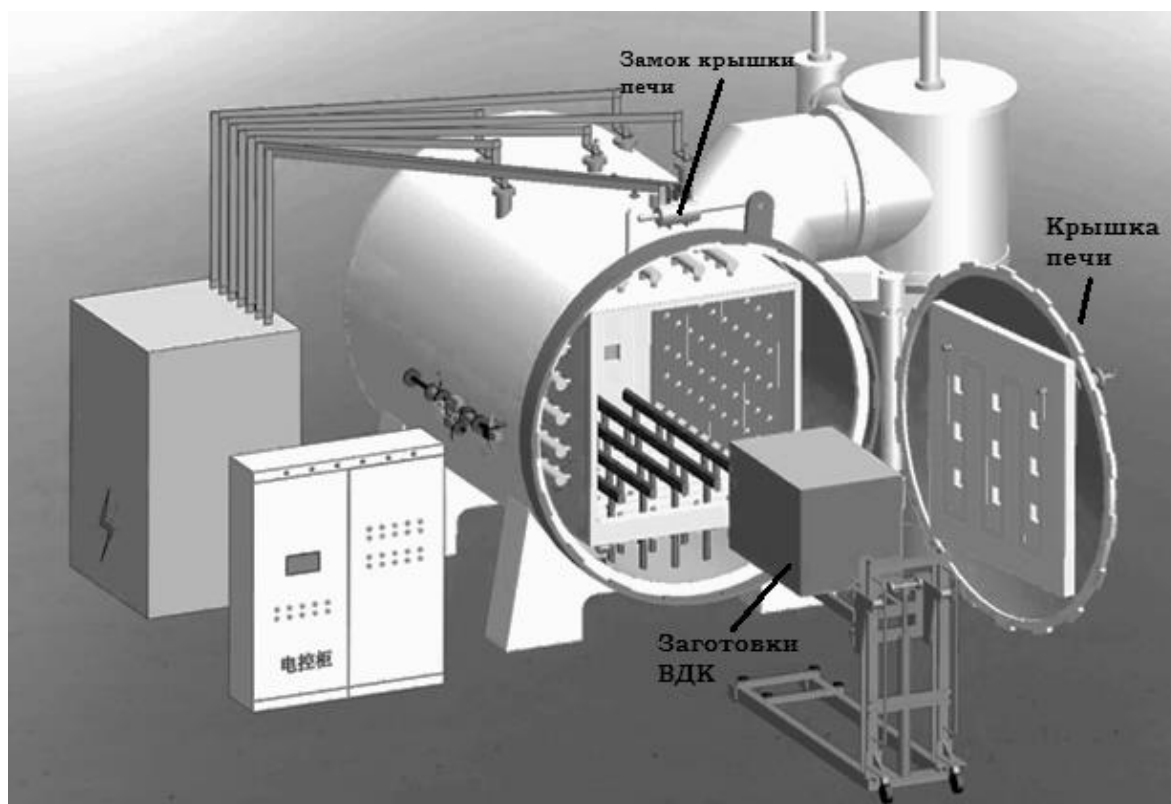


Рис. 2.28. Загрузка узлов приборов на пайку

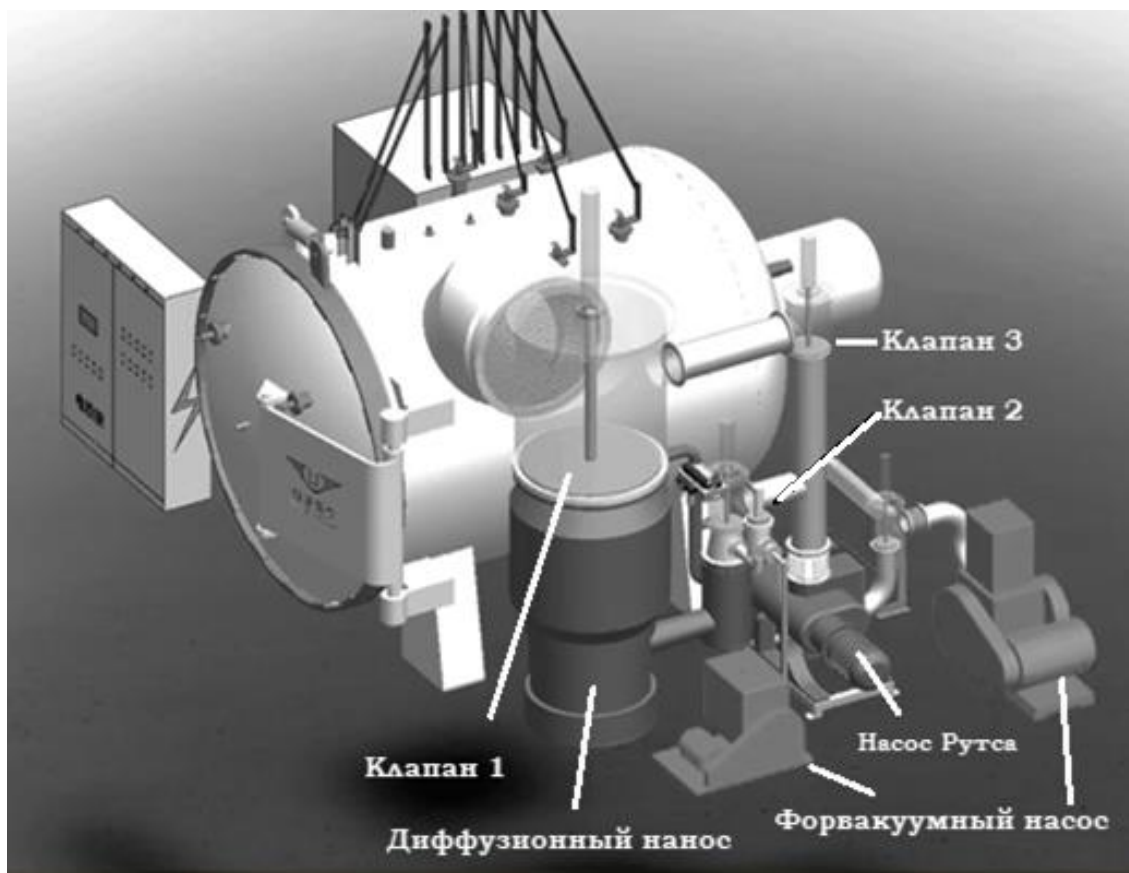


Рис. 2.29. Предварительная откачка объема печи «Schment»

При вакууме близком к 6 мм рт. ст. автоматически включается насос Рутса (рис. 2.29), который продолжает откачку до значений давления $3,75 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.

Предварительный выбор низкого вакуума проходит по следующему алгоритму, автоматически выполняющемуся компьютерной системой, при нажатии клавиши «Программа Вкл» («Programm Ein») (Условие: печь закрыта и «Главный выключатель нагрева» выключен):

1. Если в установке действует избыточное давление, открывается клапан сброса избыточного давления. Давление снижается до нормального значения (~ 773 мм рт. ст.). После этого клапан сброса избыточного давления закрывается.
2. Открывается вакуумный клапан для выравнивания давления между камерой вакуумной печи и всасывающим вакуумпроводом.

3. По истечению времени около 30 секунд открывается клапан 3.
4. Вакуумный клапан закрывается.
5. Происходит пуск насоса предварительного вакуума (форвакуумный насос). В камере создается вакуум.
6. При вакууме, начинающимся приближаться к 6 мм рт. ст., включается насос Рутса.
7. Если точка переключения высокого вакуума снижается, начинается отчет времени программного датчика.

При достижении вакуума в диффузионном насосе порядка $3,75 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. включается нагрев диффузионного насоса. При достижении температуры масла в насосе температуры 220 °С (этот процесс занимает порядка 20 минут) насос готов к работе и через клапан 1 может быть подключен к объему печи (при условии, если давление в ней не хуже $3,75 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.).

Если во время нагрева масла давление в диффузионном насосе повышается до значения $>3,75 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., закрывается клапан 3, а клапан 2 открывается, пока вакуум в диффузионном насосе не достигает значения $<4,5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. После чего программный алгоритм переходит в режим выборки высокого вакуума.

1. Если уровень вакуума в камере и в готовом к эксплуатации диффузионном насосе (>200 °С) становится ниже $<4,5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., клапан 3 закрывается.
2. Открывается клапан 2.
3. По истечению времени задержки открывается клапан 1.

До включения диффузионного насоса открывается клапан 1, а клапан 3 закрывается. Производится откачка остаточного газа из печи до величины $5,2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

После достижения необходимого в вакуумной печи давления включается система внутреннего нагрева (рис. 2.30): до 600 °С (длительность этапа 60

минут) для прогрева и обезгаживания (длительность этапа 20 минут); повышение температуры до 820 °С (длительность этапа 20 минут) для плавления припоя (длительность этапа 3-5 минут).

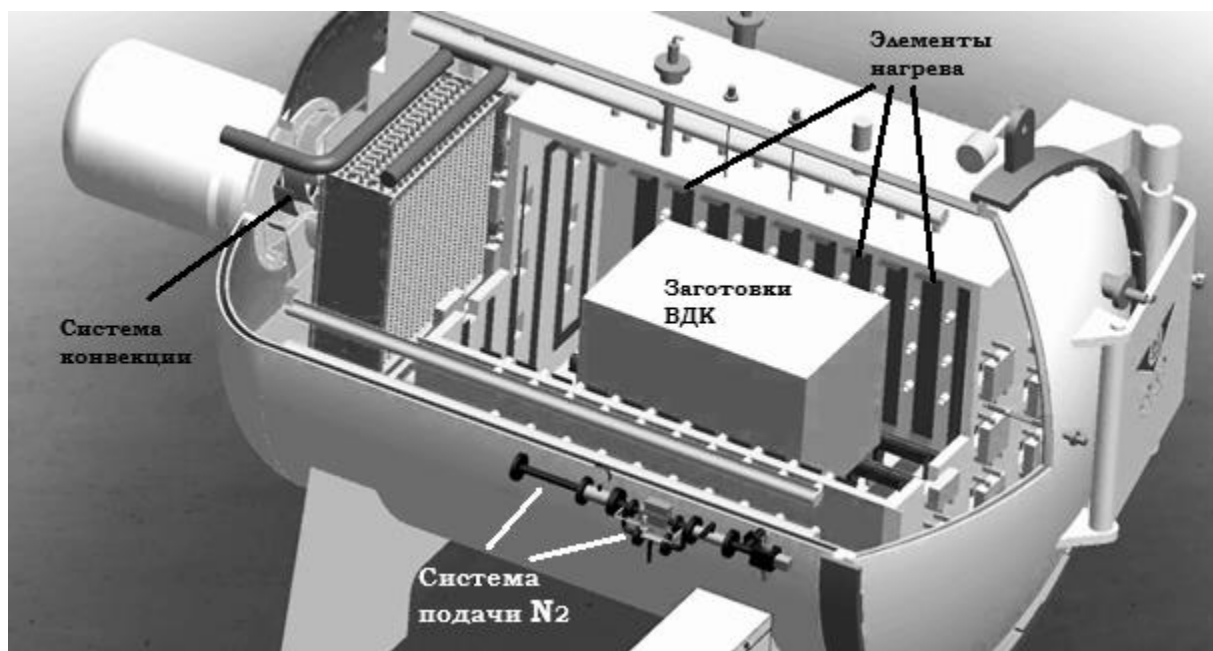


Рис. 2.30. Включение системы нагрева внутри печи «Schment»

По достижению оптимальной температуры и пайки всех швов, происходит отключение насосов, кроме предварительной откачки, и включается система подачи инертного газа (рис. 2.30). Начинается процесс охлаждения (длительность этапа 360 минут). Азот начинает подаваться, при падении температуры в печи до 400 °С. Включается режим конвекции и охлаждения до 40 °С (длительность этапа 30 минут).

К началу режима охлаждения или к пуску режима работы «Конвекция» вакуумный клапан 1 закрывается (в режиме работы «Парциальное давление»). Насос Рутса отключается к началу охлаждения. С сообщением на панели управления «Конец программы» («Programm Ende») система откачки отключается в следующей последовательности:

- Вакуумный клапан 1 закрывается.
- Вакуумный клапан 2 закрывается.

- Нагрев диффузионного насоса отключается.
- Насос Рутса отключается.
- Насос предварительного вакуума всасывает на диффузионном насосе, пока температура в насосе не снизится до значения $<100^{\circ}\text{C}$, и затем отключается.

Завершающим этапом является выгрузка готовых (паянных) крупногабаритных КДВ, в том числе КДВ-110 (рис. 2.31).

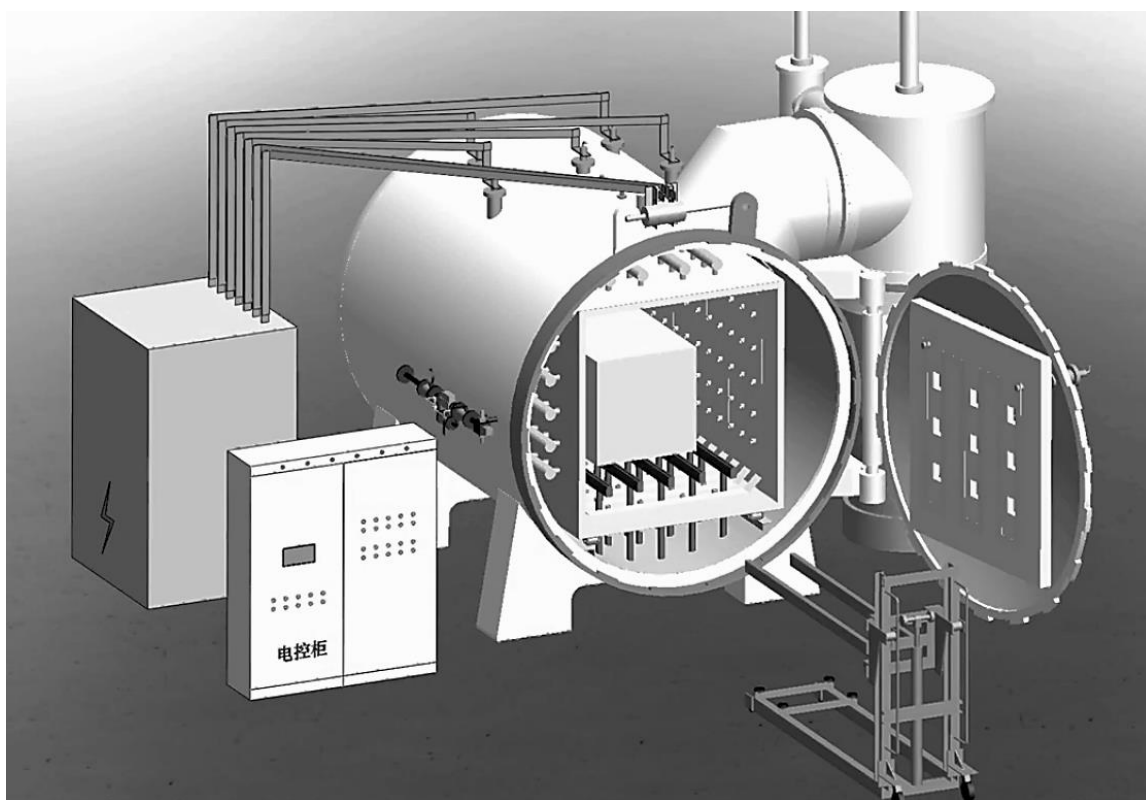


Рис. 2.31. Извлечение паянных КДВ из печи «Schment»

2.7 Процесс откачки на новом оборудовании

Сборка КДВ осуществляется предварительно спаянными первым припоем (вольфрам-титановый) узлов в водородной печи «Farnet», имеющих один или несколько незапаянных швов между ними. Затем закладывается второй (серебрянно-никелевый ПСр-72В) припой с более низкой, чем у первого

припоя, температурой плавления. Групповая (несколько штук) герметизация КДВ-110 производится в вакуумной печи «Schment». Откачка газа из объема печи осуществляется при температуре не более 100 °С с длительностью, достаточной для удаления газа из внутреннего объема изготавливаемой КДВ через незапаянные швы. Осуществляется нагрев до температуры обезгаживания узлов КДВ со скоростью, выбранной из условия обеспечения давления внутри КДВ не более 10^{-2} Па, с выдержкой при этой температуре. Проводится кратковременный нагрев и выдержка при температуре плавления второго припоя. После снятия нагрева герметизируются швы с керамикой. Бесштенгельная откачка и герметизация обеспечивает при этом возможность групповой обработки вакуумных дугогасительных камер большого размера и совмещение операций сборки, откачки и герметизации.

Введение в производство ООО «Вакуумные технологии», как показано в разделе 1.3.3, новых технологий связано с развитием электротехники и внедрению в эту сферу вакуумных дугогасительных камер на номинальное напряжение 110 кВ и выше.

Бесштенгельный способ откачки обеспечивается в проведении операций внутреннего объема собранной из деталей или узлов КДВ и герметизации швов ее корпуса в вакуумной печи. Откачка и обезгаживание КДВ осуществляется через зазор или зазоры в швах незагерметизированного корпуса, а его герметизация происходит в результате плавления припоя предварительно, заложенного в этих швах, после того как температура в печи поднимается выше точки плавления припоя, а затем отверждение после снятия нагрева. Это позволяет значительно увеличить объемы производства за счёт одновременной откачки нескольких приборов.

Критерием коммутационного ресурса является наибольший допустимый износ контактов, при которых еще сохраняется работоспособность КДВ [51]. Состояние контактов зависит от свойств вакуумной дуги: материала

электродов; скорости подъема (изменения) напряжения (хода движения контактов); конфигурации и размеров контактных систем; степени обезгаживания (элементов, всего прибора); чистоты поверхности деталей (узлов), подверженных пайке; конфигурации камеры разрядного промежутка и др.

Для нормальной работы КДВ (рис. 2.1) в их полости необходимо создать и поддерживать определенный вакуум. Высокие требования к разрежению в современных КДВ связаны с большими напряженностями электрических полей внутри прибора и влиянием остаточных газов и их ионов на работу приборов.

В процессе откачки и обезгаживания металлокерамических КДВ необходимо не только получить заданное разрежение в приборе, но и создать условия, исключающие повышение давления выше допустимого при его эксплуатации и хранении.

Технологический процесс откачки и обезгаживания КДВ состоит из трех основных этапов: удаление основной массы газа из полости прибора, обезгаживание элементов внутренней части прибора и стенок его оболочки и проведение специальных технологических процессов, направленных на формирование определенной структуры поверхности электродов.

На первом этапе обработки КДВ необходимое разрежение в полости прибора достигается применением соответствующих средств безмасляной откачки в вакуумных печах.

Необходимость проведения второго этапа обработки связана с тем, что материалы, из которых изготовлены оболочка прибора и его внутренняя арматура, содержат значительное количество газа.

При недостаточном обезгаживании прибора, растворимый в материале газ выделяется во время работы и хранения изделия.

Комплекс технической очистки деталей и прибора, включающий метод химической и термической очистки реализован при организации

производственных процессов, включающих не только операции очистки, но и очистку в условиях чистого производства, подготовки, хранения и сборки деталей, узлов, приборов с использованием шлюзовых камер, защитной атмосферы, чистых зон, чистых комнат, сквозного постоянного пооперационного контроля чистоты свариваемых деталей, непрерывного контроля герметичности свариваемых узлов и приборов.

Применение сплава Cu-Cr, полученного методом порошковой металлургии, в высоковольтных КДВ обеспечивает наилучшие условия образования вакуумной дуги на поверхности электродов и надежность приборов [14].

Преимущество бесштенгельного способа откачки заключается в том, что возможна групповая одновременная откачка и герметизация нескольких приборов за одну загрузку в вакуумную печь. Известно большое число технических решений по бесштенгельному способу изготовления КДВ: патент СССР № 938756 от 15.07.1977 г., Patent EP 0409047 от 23.01.1991 г., Patent US 5222651 от 29.06.1993 г., Patent US 8039771 от 18.10.2011 и другие.

Определен наиболее эффективный способ откачки и герметизации вакуумных дугогасительных камер в вакуумной печи: вакуумные дугогасительные камеры собраны из предварительно спаянных первым припоем узлов и имеют один или несколько незапаянных между узлами швов, в которые заложен второй припой, имеющий более низкую, чем первый, температуру плавления, с последующими операциями: откачки объема печи, нагревом до температуры обезгаживания, выдержки при этой температуре в течение времени, необходимого для обезгаживания поверхностей КДВ, кратковременного нагрева и выдержки при температуре плавления второго припоя, заложенного в швы между узлами, снятия нагрева, герметизации швов после отверждения второго припоя и остывания печи.

Определен график нагрева и охлаждения печи показан (рисунок 2.32 (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. б: участок АВ соответствует откачке вакуумной камеры до давления порядка 10^{-3} мм рт. ст.; участок ВС – выдержка при температуре 100 °С для удаления газов, выделяющихся из деталей; CD – подъем температуры и откачка турбомолекулярным насосом до давления около 10^{-6} мм рт. ст.; DE – обезгаживающий отжиг; EF – подъем температуры до плавления припоя; FG – пайка и герметизация камеры; GH – охлаждение печи). Показано, что прибор находится в диапазоне температуры обезгаживания 650 - 750 °С. Установлено, что давление во время проведения обезгаживания и плавления припоя в печи должно не превышать $7,5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.

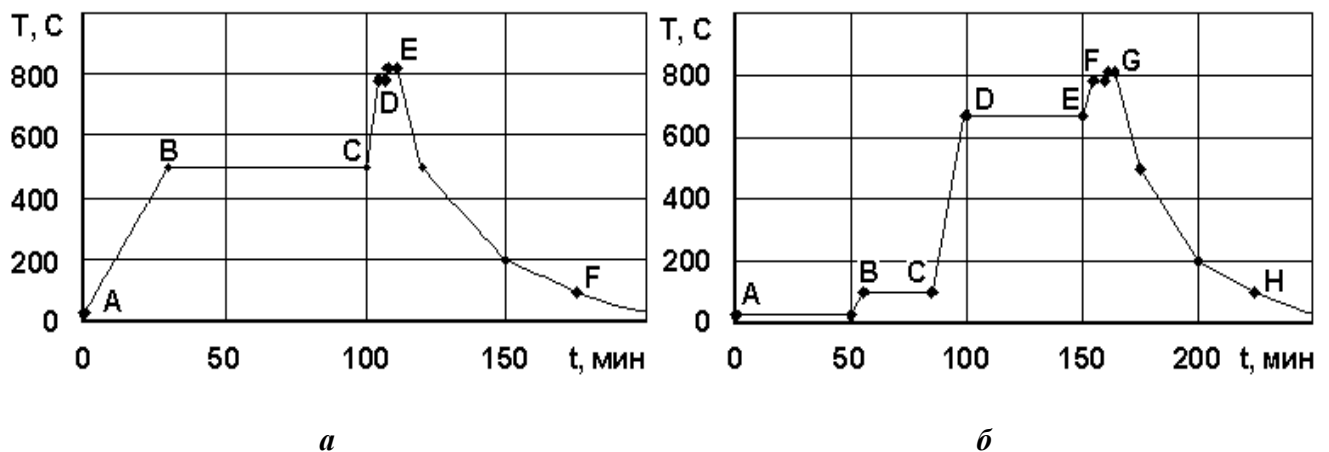


Рис. 2.32. Температурные режимы пайки в водородной (а) и вакуумной (б) печах

Установлены особенности способа откачки и герметизации КДВ на напряжение 110 кВ, имеющих большой внутренний объем. Поскольку откачка происходит через щелевые отверстия незапаянных швов, то снижение давления внутри самих КДВ происходит медленно, так как проводимость этих отверстий при молекулярном режиме течения газа мала, а количество газа, находящегося

во внутреннем объеме КДВ, велико. При одновременном с этим нагревом печи происходит газовыделение из корпуса прибора, что приводит к еще большему замедлению процесса откачки и снижению давления внутри КДВ. При температуре внутри печи свыше 100 °С может начаться процесс окисления деталей из меди и хрома внутри КДВ в результате взаимодействия их с остаточным газом, содержащим кислород. Контролировать давление непосредственно внутри КДВ сложно без компьютерного контроля корректировать скорость нагрева печи.

Определен способ дополнительной откачки объема печи проводится дополнительная операция выдержки при температуре не более 100 °С, длительностью, достаточной для откачки газа из внутреннего объема камер через незапаянные швы при температуре, позволяющий использовать бесштенгельную откачку и герметизацию для изготовления вакуумных дугогасительных камер на высокое напряжение (100 кВ и выше). Часто откачка и герметизация в объеме вакуумной печи вакуумных дугогасительных камер, собранных из предварительно спаянных первым припоем узлов и имеющих один или несколько незапаянных швов между этими узлами с заложенным в них вторым припоем с более, чем у первого припоя, низкой температурой плавления, и содержащего операции:

- откачки объема печи;
- нагрева до температуры обезгаживания;
- выдержки при этой температуре;
- кратковременного нагрева и выдержки при температуре плавления второго припоя в швах между узлами;
- снятия нагрева;
- герметизации швов и остывания печи.



Рис. 2.33. Бесштенгельные камеры различных номиналов и габаритных размеров

Бесштенгельная технология позволяет загружать большой объём камер в печь для отжига и откачки, что в отличие от технологии откачки с помощью штенгеля невозможно.

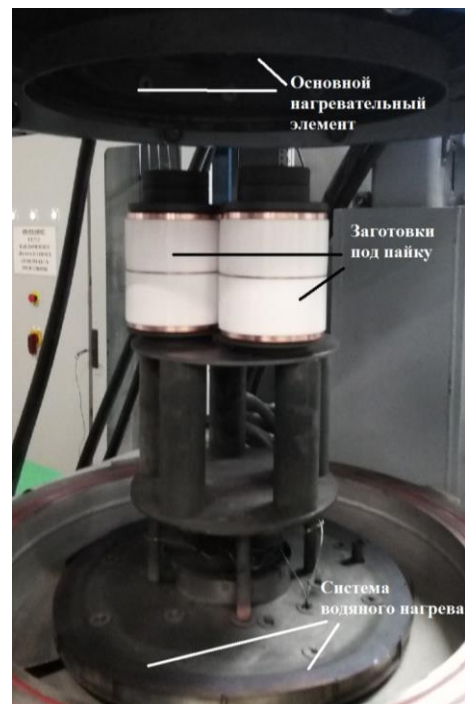


Рис. 2.34. Бесштенгельная и штенгельная камеры одинакового номинала, но различного исполнения

На протяжении всего технологического процесса контроль температуры осуществляется встроенной в печь термопарой. В начале процесса исследований, направленных на получение качественной пайки узлов, в печи наблюдался градиент температуры по отношению верхней и нижней частей печи до 14 °С (рисунок 2.35а). Для устранения данной проблемы, после многих проб с возможностью получения качественной пайки, было найдено решение - осуществлено изменение конструкции печи: первое -подсоединение водяного обогрева к нижней зоне, позволившее получить более плавный нагрев внутреннего объема печи, однако требовало длительного времени для минимизации градиента температур верхней и нижней частей печи; второе – изменение в конструкции печи, потребовалось изменение направления подачи водорода и азота с верхней часть печи, откуда под давлением газы в горячем состоянии направляются ко дну. (рисунок 2.35б)



а



б

Рис. 2.35. Установка заготовок в водородную печь:

а – старая конструкция; б – новая конструкция

Для того, чтобы медь и керамика равномерно прогревались, надо было подобрать скорость подачи газа в печь. Ниже приведены графики прогрева заготовок в зависимости от скорости подачи газа.

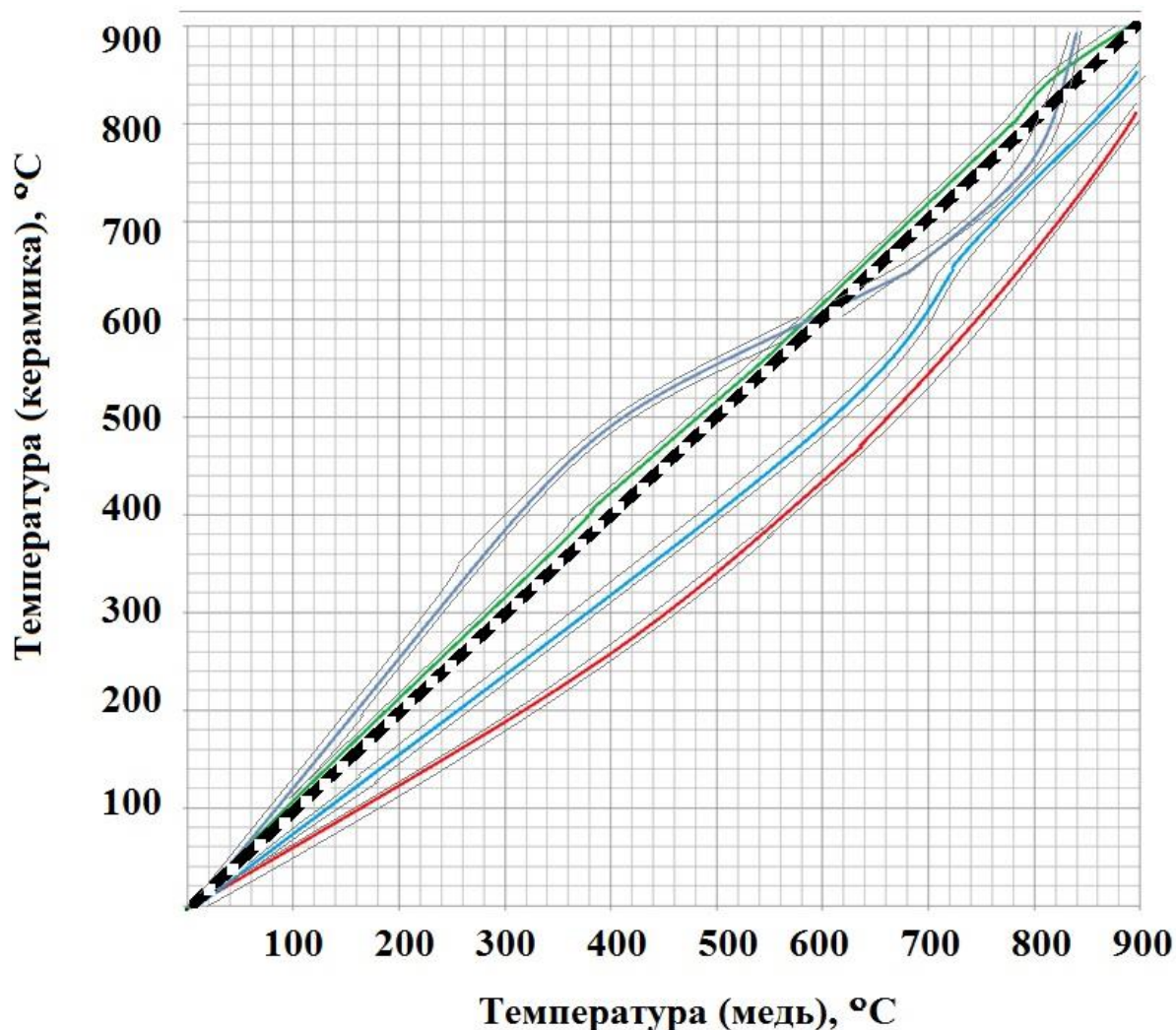


Рис. 2.36. Графики прогрева заготовок в зависимости от скорости подачи газа (красный - 0,8 м³/ч; голубой - 1,05 м³/ч; зеленый - 1,25 м³/ч; синий - 1,35 м³/ч)

В результате исследования подобрана оптимальная скорость подачи газа, которая равная 1,25 м³/ч, что обеспечило более равномерный нагрев верхней и нижней частей внутреннего объема печи (пространства под колпаком) и позволило снизить градиент температуры, сегодня в водородной печи он составляет 3 – 4 °C.

2.8 Выводы по II главе

1. Показана целесообразность осуществления групповой бесштенгельной откачки при производстве металлокерамических высоковольтных вакуумных дугогасительных камер.
2. Впервые представлена и подтверждена на основе теоретической модели пайки металлокерамических узлов структура токопроводящего блока металлокерамической высоковольтной КДВ камеры на 110 кВ с указанием вида используемых материалов и режимов пайки узлов.
3. Представлен и обоснован новый режим пайки (сборки) крупногабаритных высоковольтных вакуумных дугогасительных камер с использованием нового современного оборудования.
4. Представлен температурный график производства КДВ, отражающий этапы откачки, обезгаживания, пайки и остывания припоя.
5. Установлено, что компьютерные 3D системы управления водородной печью обеспечивают контроль и поддержание необходимого равенства температур всех зон водородной камеры печи при откачке, обезгаживании, пайке и остывании припоя, включая, режимы термической чистки (обезгаживающего отжига), несмотря на существование градиента температуры по сечению камеры в процессе входа в установившийся режим.
6. Проанализирована и показана возможность применения бесштенгельной групповой обработки (откачка, отжиг, пайка) дугогасительных вакуумных металлокерамических высоковольтной камеры КДВ-110.
7. Показано, что применение групповой сборки крупногабаритных вакуумных дугогасительных камер с использованием пайки

высокотемпературными (до 900 °С) припоями и одновременного группового вакуумирования и герметизации бесштенгельным способом в водородных и вакуумных печах с большими рабочими объемами обеспечивает получение качественной конкурентоспособной продукции при сравнительно высоком выходе годных изделий.

8. Рассчитано время снижения давления внутри КДВ-110 в результате молекулярного истечения через щели остаточного газа, исключающего процесс окисления деталей камеры, равное $t = 14-15$ мин.
9. Проведена оценка возможности и целесообразности использования в технологическом процессе способов контроля вакуума в готовых изделиях и герметичности их оболочек с помощью квадрупольных масс-спектрометров.
10. Обнаружены молекулы остаточного гелия He^+ и молекул N_3^+ в ходе тестирования герметичности устройств в поверхностных слоях и в рабочей среде уже после проведения операций по проверке качества герметичности оболочки и водородного отжига деталей КДВ, а также после коммутационных испытаний.
11. Показано, что молекулы N_3^+ формируются на стадии водородного отжига деталей КДВ и регистрируются в дальнейших процедурах анализа остаточной атмосферы квадруполем (молекулы N_3^+ входят в состав поверхностных атомных слоев всех деталей вакуумного прерывателя).
12. Показан и описан эффект наследования технологических примесей от предшествующих операций. Инициатором дугового разряда в вакуумном промежутке на начальной стадии, скорее всего, служат не только атомные составляющие материала электродов, но и

компоненты поверхностных адсорбированных слоев, накопленные в ходе предшествующих технологических воздействии

13. Найдены как ионные линии технологических газов, так и линии, соответствующие диффузионным маслам типа $C_xH_y^+$, молекулам десорбируемых со всех деталей КДВ и ионы остаточного газа (CO_2^+ , H_2O^+ , N_2^+ , N^+ и их полиатомные композиции).
14. Объяснена большая массовая доля водорода применяемой технологии при производстве вакуумных камер, в частности, при операциях пайки и отжига в водородной печи.
15. Сегодня предприятие ООО «Вакуумные технологии» поставляет свою продукцию организациям как на территории РФ, так и в странах СНГ. На предприятии создан и реализуется замкнутый технологический процесс производства металлокерамических высоковольтных вакуумных изделий, высокое качество которых достигается системой непрерывного контроля качества на всех этапах технологической цепочки.

В систему проектирования документации на предприятии внедрены компьютерные программы автоматизированного 3D проектирования и электронного документооборота.

ГЛАВА III

Деградация электродов КДВ в процессе их эксплуатации и воздействия различных факторов. Повышение надежности приборов

3.1 Изучение поверхности контактов КДВ с применением метода атомно-силовой микроскопии

Сканирующий зондовый микроскоп (АСМ) является одним из инструментов анализа микро- и наноперехностей. Часть исследований проводилось на сканирующем зондовом микроскопе «NanoEducator» (Рис.3.1).

Достоинствами данного прибора следующее:

- легкость в обращении;
- отсутствие сложных настроек и юстировок;
- применение видеокамеры для визуального надзора состояния зонда;
- дешевый и быстро восстанавливаемый зонд;
- синхронизированный программный интерфейс в ОС Windows XP/7/10;
- подключение электронного блока к РС через порт USB2.0;



Рис.3.1. Сканирующий зондовый микроскоп «NanoEducator»

АСМ «NanoEducator» позволяет проводить различные методы измерений туннельной и «полуконтактной» атомно-силовой микроскопией и может использоваться как в учебных, так и в научных целях при исследованиях в области физики и технологии микро- и наноструктур, материаловедения, физики и химии полимеров, и т. п.

3.1.1 Исследование поверхности контактов КДВ

Как уже говорилось, работы по разработке принципов гашения электрической дуги, начатые Германии, России, США, Франции, в 20-м столетии, привели к созданию варианта прибора на основе вакуума, электрическая прочность которого многократно превышает электрическую прочность воздуха в обычных условиях. Это определило их название вакуумные выключатели (ВВ) и вакуумные дугогасительные камеры (КДВ). Данные приборы являются базовыми элементами в коммутационной аппаратуре для защиты электрооборудования от перенапряжения и токов короткого замыкания, контакторов, выключателей нагрузки, аппаратов секционирования (реклоузеров) и др.

Очевидно, что целенаправленный поиск невозможен без понимания процессов в вакуумной дуге, знания механизмов и роли материала контактов на развитие процессов в вакуумном выключателе.

Развитие и гашение дуги в высоковольтном выключателе реализуется двумя конкурирующими процессами ионизации и деионизации. Условие устойчивости дуги обеспечивается равенством скорости генерации ионов и скорости рекомбинации и диффузионной релаксации плазмы дуги (время 10-50 мкс) [87].

При этом начальная концентрация плазмы и геометрии промежутка определит восстановление электрической прочности камеры, достигаемое при

уровне концентрации частиц с длиной свободного пробега превышающем размеров промежутка. Проанализируем роль кинетических и магнитодинамических неустойчивостей плазмы дуги.

Предел отключающей способности камеры обычно объясняют образованием на контактных поверхностях перегретых центров эмиссии пара. Полагают, что давление паров соответствует минимуму кривой Пашена, соответствующего предельному току отключения, но это, исключает процессы распада плазмы в промежутке.

Проблема уменьшения габаритных размеров камеры, например, решалась близким расположением контактной группы. При этом, однако, потребовалось одновременно магнитное и механическое контрагирование плазмы дуги. Магнитное контрагирование обеспечивают аксиальная и радиальная составляющие, в то время как механическое достигалось заглублением токоведущего неплюского дискового электрода внутри индукторов магнитных полей. (Не плоский характер дисковых электродов частично решает проблему неполного их контакта при смыкании, что поясняется рис.3.2).

В работе анализируется тенденция применения многокомпозиционных электродных материалов, в частности, на основе сплавных систем (Cu 60 % - Cr 40 %). Это обусловлено противоречивыми требованиями к материалам контактов по электропроводности, механической и эрозионной устойчивости, которые невозможно реализовать однородным моноатомными металлическими контактами в условиях вакуумного дугового разряда. В тоже время известно, что контактные поверхности всех типов представляют собой поверхности развитого рельефа (рис.3.2), что было исследовано при помощи АСМ «NanoEducator»

Даже в случае тщательно шлифованных и полированных поверхностей контактов они содержат выступы и впадины микро- и нанометрового масштаба, что приводит к полевой эмиссии под действием электрического поля

прикатодного пространства. При этом коэффициент формы (фактор усиления электрического поля у поверхности катода) такого эмитирующего контакта может достигать величины 100 и 1000. С учетом данного обстоятельства для улучшения контакта электродная пара представляла собой систему выпукло-вогнутых сочленений.

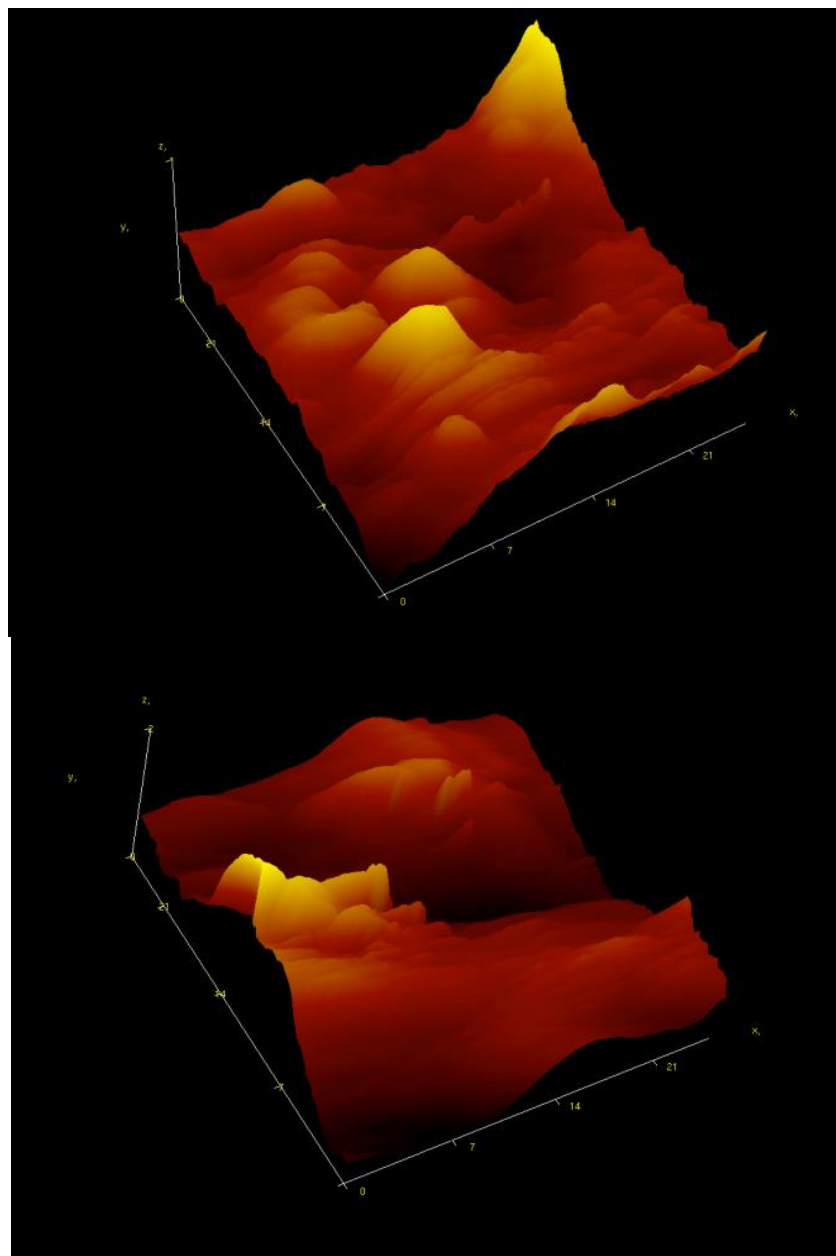


Рис.3.2. Рельеф двух участков контактов камеры

Уменьшение скорости и хода контакта снижает механические нагрузки на сильфонный узел камеры, увеличивает механическую эрозионную износостойкость, что обеспечивает требуемый ресурс камеры для целей электротермической технологии и производств с потребностью высокоинтенсивных коммутаций.

Надежность изделия достигается, применением технологической цепочки, обеспечивающей групповую двухстадийную сборку высоковольтных камер с использованием операций пайки высокотемпературными (до 900 °С) припоями (на основе серебра и титана) и одновременного вакуумирования и герметизации высокопроизводительным в вакуумных печах типа «Schmetz» разного объема.

При разработке технологий производства высоковольтных вакуумных металлокерамических дугогасительных камер использованы принципы особой чистоты технологии и всего производства изделий, начиная с заготовительных операций, пайки высокотемпературными припоями и одновременного вакуумирования и герметизации в вакуумных печах большого объема, сквозной пооперационный контроль качества поверхности свариваемых деталей на всех этапах.

3.1.2 Изучение поверхности контактов КДВ до эксплуатационного цикла

Исследование проведено на поверхности образцов электродов вакуумной камеры после их изготовления на производстве. В результате исследования, получен ряд изображений состояния поверхности данного изделия. На изображениях ниже, полученных при помощи АСМ, представлены рельефы поверхности образцов контактов вакуумной дугогасительной камеры до ввода в эксплуатацию. Проведена выборка образцов из трёх партий. Нижеприведенные

данные являются среднестатистическими показателями для каждой партии на основе исследования выбранных образцов.

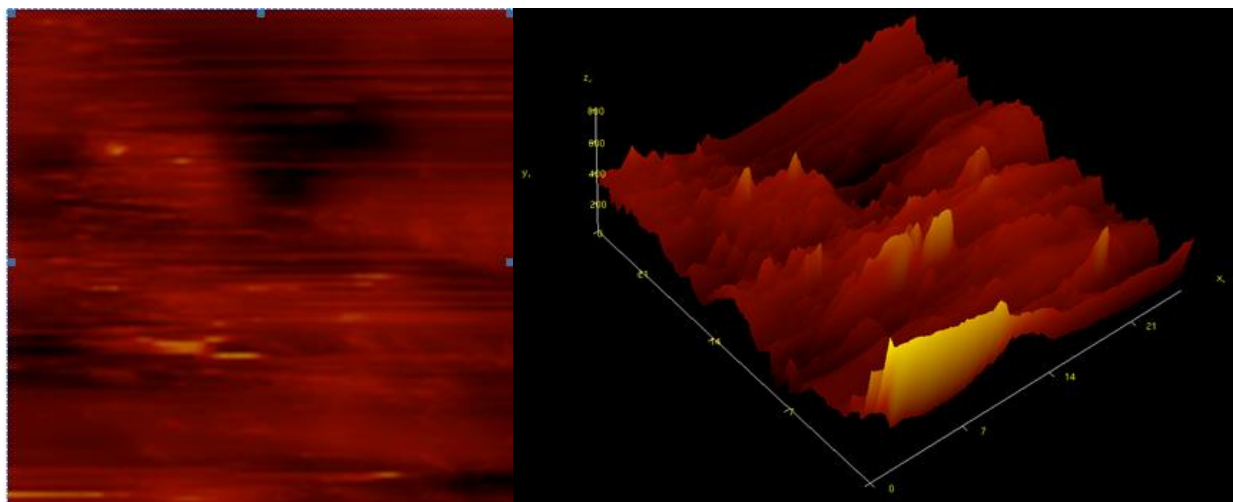


Рис.3.3. Среднестатистическое 2D и 3D изображение образцов электрода из первой партии

По результатам первого сканирования делается вывод, что поверхность имеет не гладкую структуру, максимальная величина пиков неровностей которой составляет 800 нм.

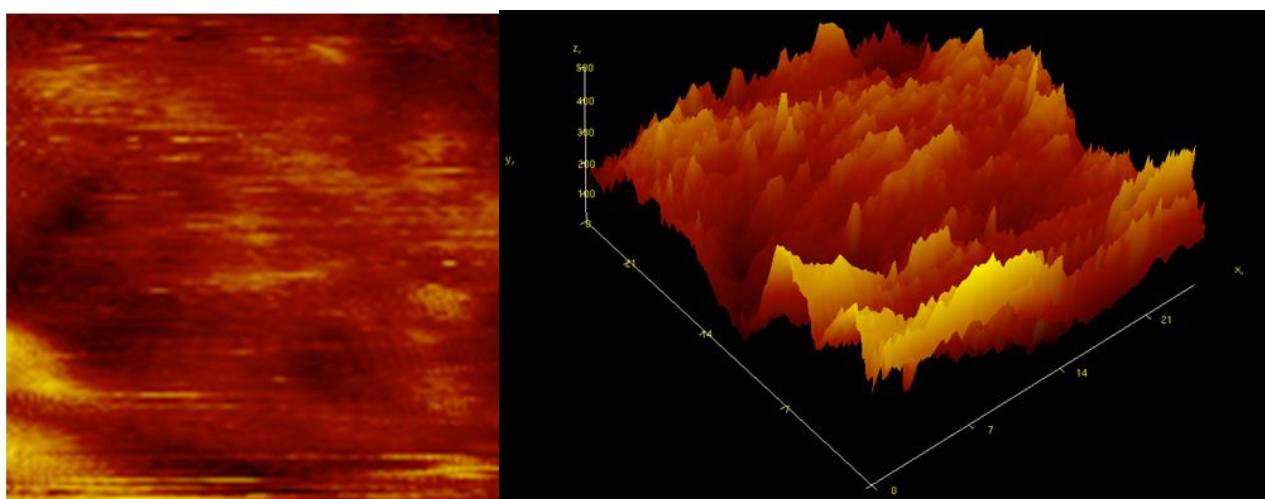


Рис.3.4. Среднестатистическое 2D и 3D изображение образцов электрода из второй партии

Выборочное сканирование образцов второй партии показало, что на данных участках поверхности структура фрактальна, максимальные пики неровности поверхности порядка 500 нм и располагаются близко друг к другу.

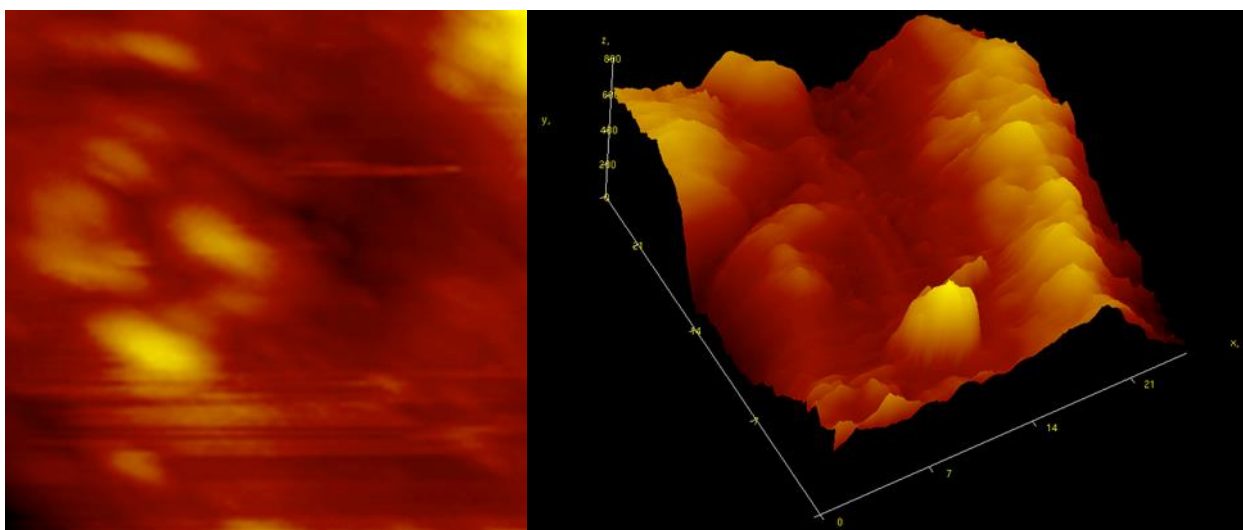


Рис.3.5. Среднестатистическое 2D и 3D изображение образцов электрода из третьей партии

Результаты сканирования третьей партии образцов указывают на отчетливый «провал» поверхности (яму). Это ещё раз свидетельствует о неравномерной структуре поверхности, максимальные пики в данной области 800 нм.

Проанализировав состояние поверхности образцов трех выборок, можно сделать вывод, что в процессе производства данного изделия, его поверхность имеет не совсем гладко ровную структуру. Такие показатели свидетельствуют о снижении запланированных физико-химических свойств конечного изделия.

3.1.3 Изучение поверхности контактов КДВ после эксплуатационного цикла

Получив данные о состоянии поверхности образцов до их ввода в эксплуатацию, следующим шагом было изучить, как изменятся структура поверхности электродов вакуумной камеры после прохождения полного эксплуатационного цикла. Данные о результатах этого исследования представлены ниже.

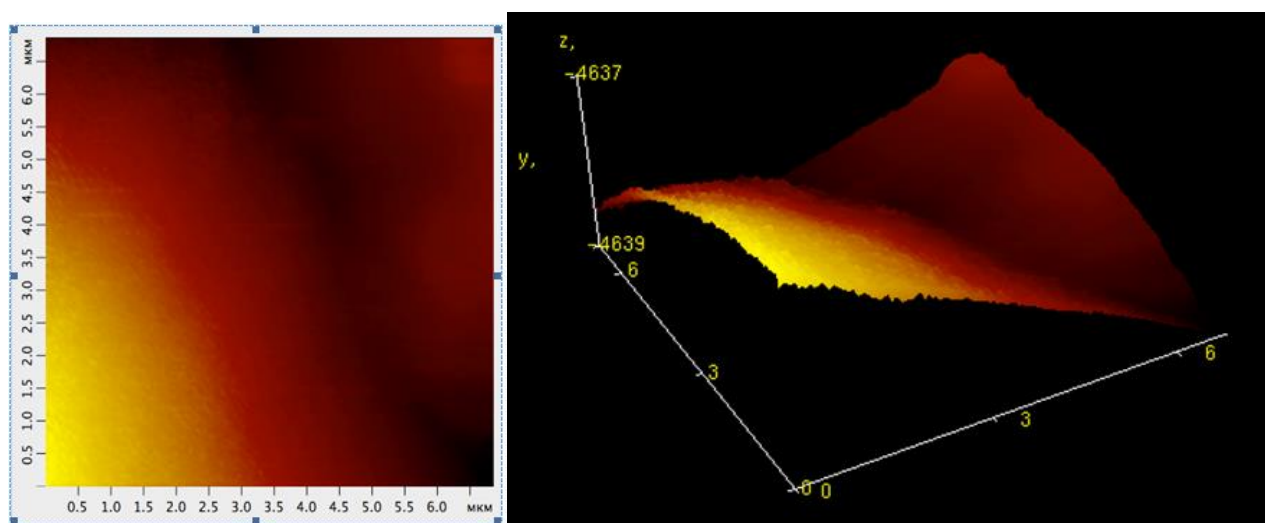


Рис.3.6. Среднестатистическое 2D и 3D изображение поверхностей образцов электрода из первой партии

На Рис.3.6 видно, что поверхность образца значительно отличается от предыдущих исследований. Высота максимальных пиков поверхности теперь составляет 120 нм.

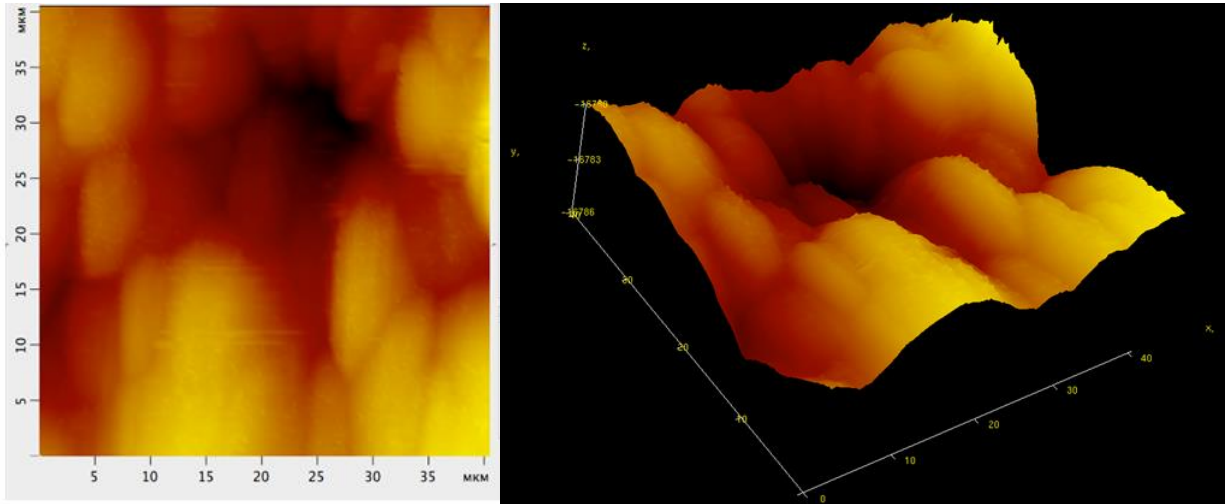


Рис.3.7. Среднестатистическое 2D и 3D изображение поверхностей образцов электрода из второй партии

На Рис.3.7 видна яма с оплавленными краями, это свидетельствует о частичном перераспределении масс вещества и испарении с поверхности электрода в процессе воздействия плазменной дуги. И как было описано выше, шероховатость поверхности электродов в вакуумных камерах играет огромную роль в процессе горения дуги между контактами КДВ в результате размыкания.

При этом сканировании видно образование значительного слоя наплавления материала с другой областей поверхности электрода. Это свидетельствует о том, что материал в процессе горения дуги перемещается с одной части поверхности на другую.

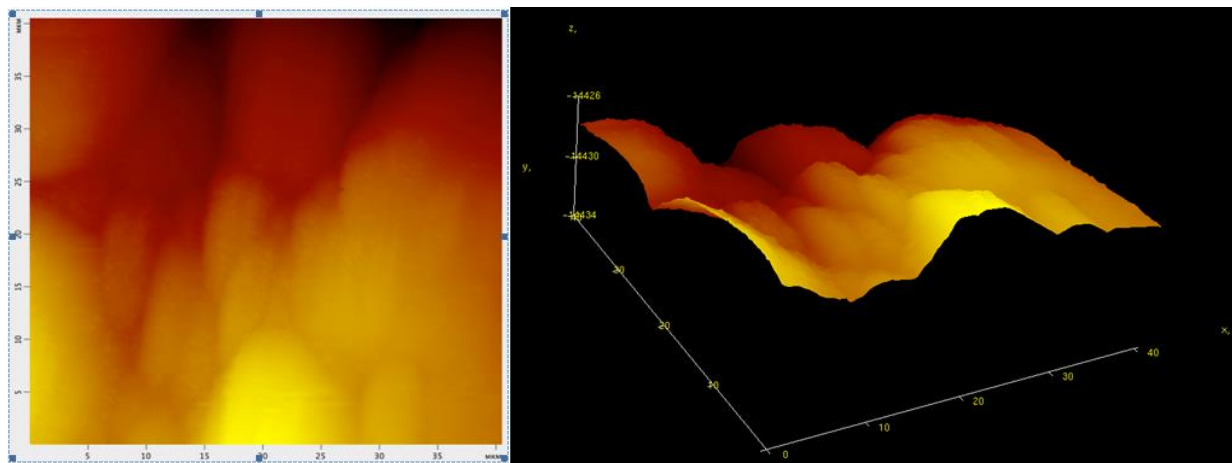


Рис.3.8. Среднестатистическое 2D и 3D изображение поверхностей образцов электрода из третьей партии

Обработав полученные результаты о состоянии поверхности электродов КДВ после эксплуатационного цикла, можно прийти к выводу о необходимости изменения технологии изготовления электродов, так как их рабочий ресурс снижается в процессе проявления физико-химических процессов.

3.1.4 Обработка результатов сканирования рельефов поверхности с использованием программного обеспечения «Gwyddion»

Gwyddion – модульная программа для анализа данных, полученных на сканирующих зондовых микроскопах. При запуске программного обеспечения (ПО), появляется стартовое окно, которое содержит набор меню и группы кнопок, связанных с функциями/инструментами.

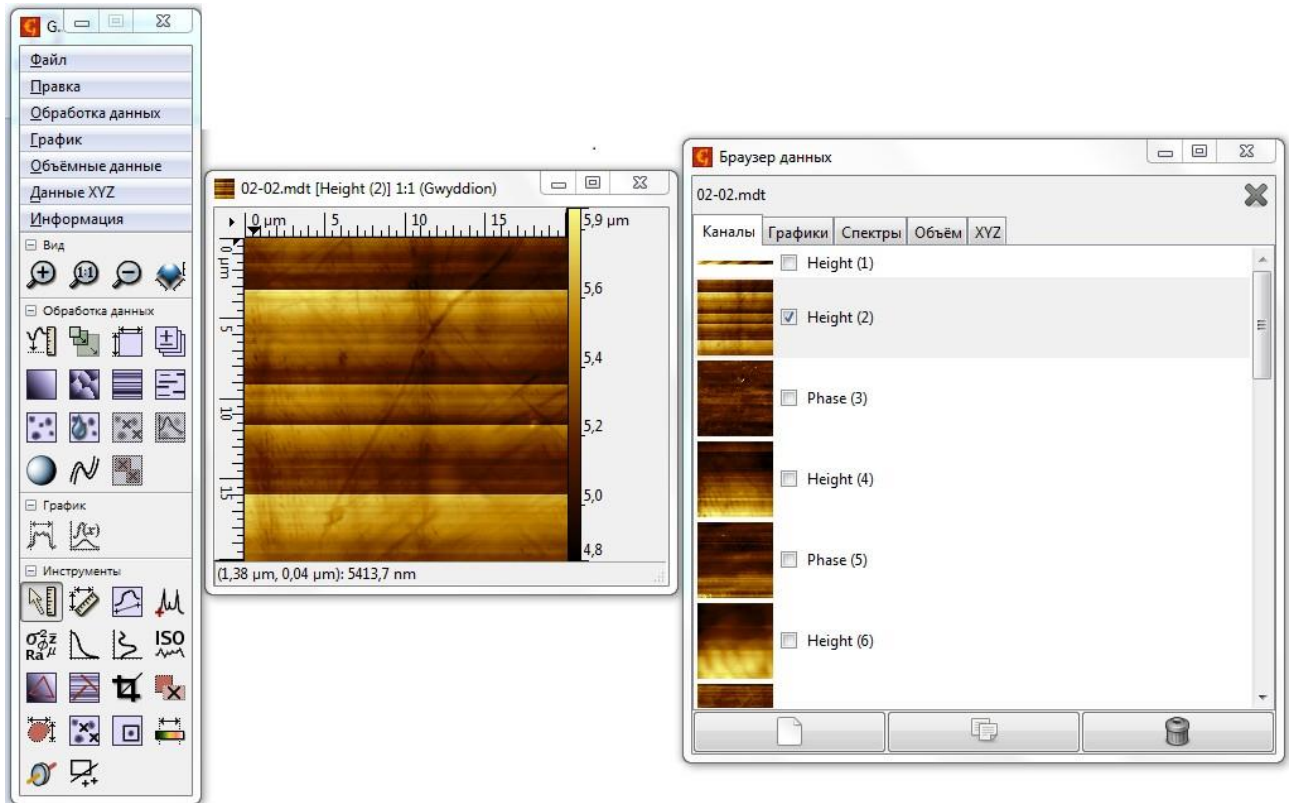


Рис.3.9. Главное окно, окно данных и браузер данных программы Gwyddion

Разберем меню функции, которое сформировано из следующих элементов (команд):

1. «Файл» — связаны с открытием и сохранением данных, их импортом и экспортом.
2. «Правка» — команды отмены и повтора операции, выбора цветов палитры или маски.
3. «Обработка данных» — состоит из модулей работы с двумерными данными. Это меню, вместе с панелью кнопок инструменты, содержит большую часть команд, которые могут понадобиться для анализ данных АСМ.
4. «График» — используется при работе с одномерными данными (например, сечение изображений). Команды этого меню позволяют аппроксимировать графики набором функций.

5. «Объемные данные» – аналогично меню, содержащее функции для работы с трехмерными массивами данных.
6. «Информация» – команды, позволяющие просмотреть информацию о программе и ее модулях.

Рассмотрим кнопки главного окна программы:

1. «Вид» – содержит функции масштабирования и включения трехмерного отображения.
2. «Обработка данных» и «График» – избранные функции соответствующих меню. Как правило, при доступе к этим функциям из меню можно выбрать большее количество параметров их работы, чем при доступе с панели кнопок.
3. «Инструменты» – функции, работающие с информацией в Окне данных. Эти функции доступны только с этой панели кнопок.

С целью проведения расчетов шероховатости поверхностей исследуемых образцов и построения визуализирующих ее графиков были использованы специальные инструменты интерфейса ПО «Gwyddion» для обработки АСМ рельефов. На Рис. 3.10 - 3.15 представлены графики и статистические показатели шероховатости образцов до их ввода в эксплуатацию.

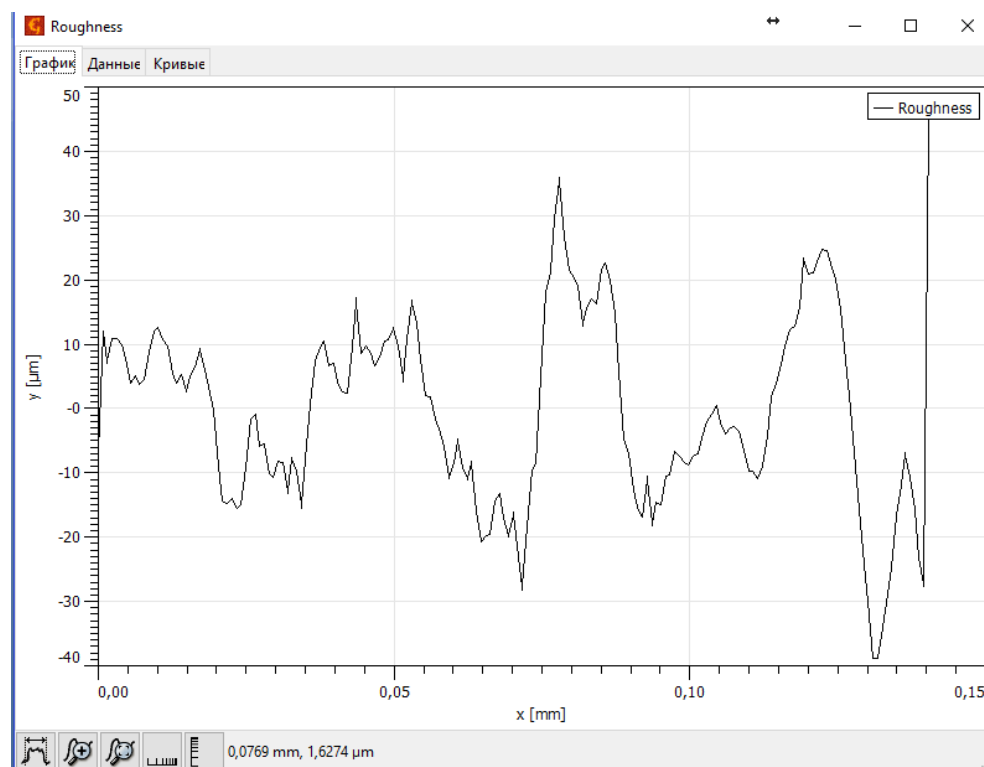


Рис.3.10. Шероховатость поверхности первой партии образцов

Параметры шероховатости

Файл: C:\Users\User\Desktop\h1am\диплом\образцы электрода\1\3d 1.2.png
 Канал данных: Value (max)

Выбранная линия: из (541, 48) в (513, 473) пикселей
 из (51,52, 4,61) в (48,86, 45,05) μm

Амплитуда

Средняя шероховатость	(Ra):	0,030 μm
Среднеквадратичная шероховатость	(Rq):	0,050 μm
Максимальная высота шероховатости	(Rt):	0,666 μm
Максимальная глубина впадины шероховатости	(Rv):	0,321 μm
Максимальная высота пика шероховатости	(Rp):	0,345 μm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rtm):	0,270 μm
Средняя максимальная глубина долины шероховатости	(Rvm):	0,134 μm
Средняя максимальная высота пика шероховатости	(Rpm):	0,136 μm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z):	0,212 μm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z ISO):	0,030 μm
Средняя максимальная высота профиля	(Rz):	0,302 μm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rz ISO):	0,270 μm
Коэффициент асимметрии	(Rsk):	0,451
Эксцесс	(Rku):	14,961
Средняя волнистость	(Wa):	0,094 μm
Среднеквадратичная волнистость	(Wq):	0,120 μm
Максимальная высота волнистости	(Wy=Wmax):	0,919 μm
Максимальная высота профиля	(Pt):	1,023 μm

Пространственные

Средняя длина волны профиля	(λ_a):	2,24 μm
Среднеквадратичная длина волны профиля	(λ_q):	1,38 μm

Гибридные

Средний по модулю наклон	(Δa):	0,08566
Среднеквадратичный наклон	(Δq):	0,2285
Длина	(L):	40,62 μm
Длина растянутого профиля	(L0):	41,37 μm
Относительная длина профиля	(1r):	1,019

Рис.3.11. Статистические данные шероховатости первой партии образцов

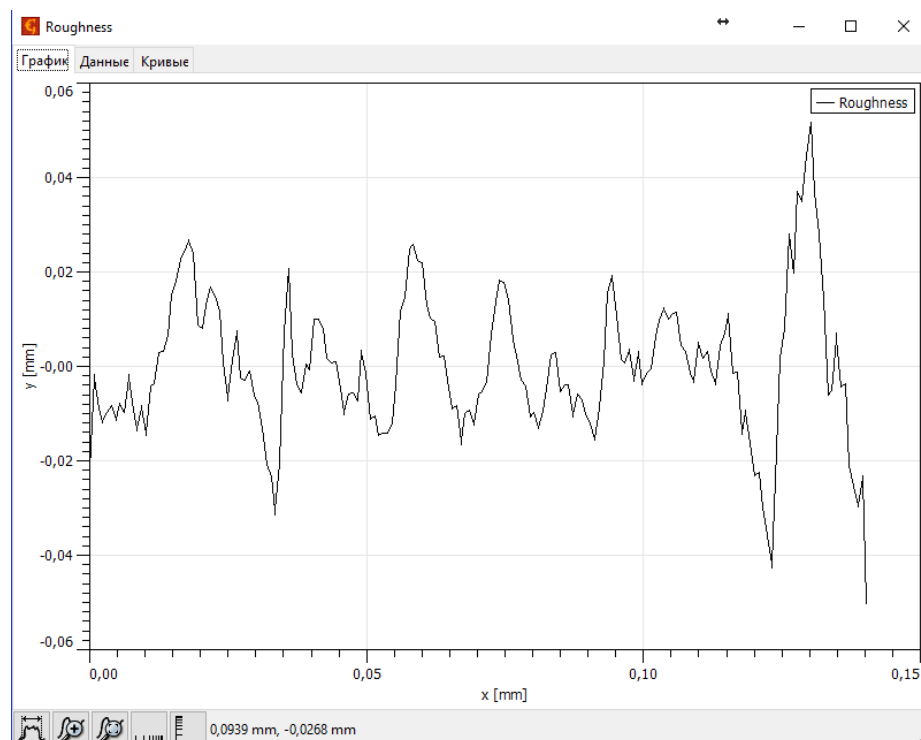


Рис.3.12. Шероховатость поверхности второй партии образцов

Параметры шероховатости

Файл: C:\Users\User\Desktop\h1am\диплом\Образцы электрода\2\2.2.tiff
 Канал данных: Red

Выбранная линия: из (0, 0) в (127, 127) пикселей
 из (0,6, 0,1) в (99,9, 99,7) μm

Амплитуда

Средняя шероховатость	(Ra):	11,2 μm
Среднеквадратичная шероховатость	(Rq):	14,9 μm
Максимальная высота шероховатости	(Rt):	102,1 μm
Максимальная глубина впадины шероховатости	(Rv):	50,5 μm
Максимальная высота пика шероховатости	(Rp):	51,6 μm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rtm):	52,9 μm
Средняя максимальная глубина долины шероховатости	(Rvm):	25,7 μm
Средняя максимальная высота пика шероховатости	(Rpm):	27,2 μm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z):	56,3 μm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z ISO):	6,3 μm
Средняя максимальная высота профиля	(Rz):	57,3 μm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rz ISO):	52,9 μm
Коэффициент асимметрии	(Rsk):	0,232
Эксцесс	(Rku):	4,349
Средняя волнистость	(Wa):	18,8 μm
Среднеквадратичная волнистость	(Wq):	21,8 μm
Максимальная высота волнистости	(Wy=Wmax):	271,1 μm
Максимальная высота профиля	(Pt):	313,6 μm

Пространственные

Средняя длина волны профиля	(λ_a):	9,7 μm
Среднеквадратичная длина волны профиля	(λ_q):	9,5 μm

Гибридные

Средний по модулю наклон	(Δa):	7,261
Среднеквадратичный наклон	(Δq):	9,881
Длина	(L):	141,1 μm
Длина растянутого профиля	(L_0):	1054,1 μm
Относительная длина профиля	(l_r):	7,970

Рис.3.13. Статистические данные шероховатости второй партии образцов

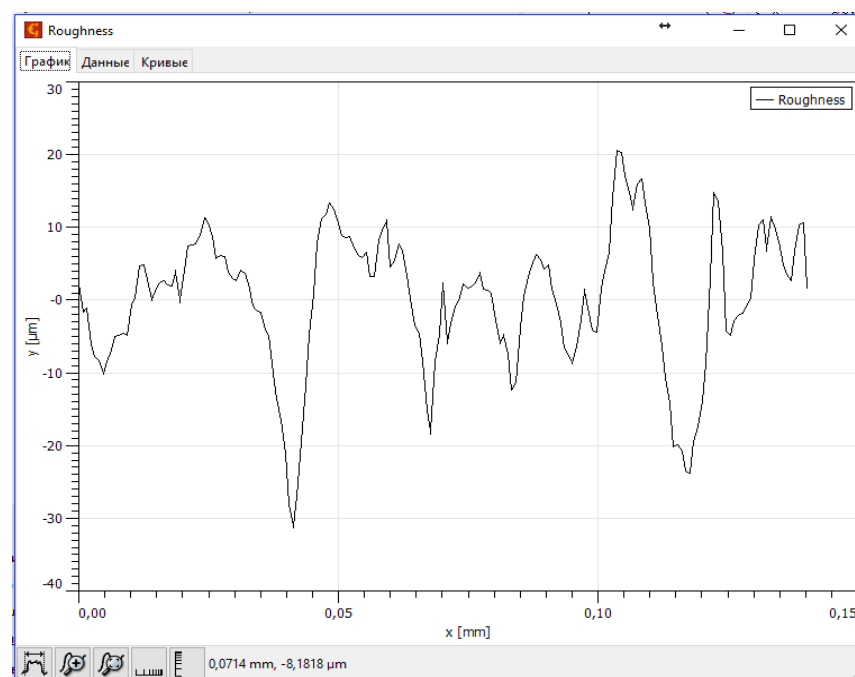


Рис.3.14. Шероховатость поверхности третьей партии образцов

Параметры шероховатости

Файл: C:\Users\User\Desktop\h1am\диплом\Образцы электрода\6\6.1.tiff
 Канал данных: Red

Выбранная линия: из (0, 0) в (127, 127) пикселей
 из (0,3, 0,1) в (99,9, 99,9) µm

Амплитуда

Средняя шероховатость	(Ra):	7,3 µm
Среднеквадратичная шероховатость	(Rq):	9,5 µm
Максимальная высота шероховатости	(Rt):	51,7 µm
Максимальная глубина впадины шероховатости	(Rv):	30,9 µm
Максимальная высота пика шероховатости	(Rp):	20,7 µm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rtm):	31,4 µm
Средняя максимальная глубина долины шероховатости	(Rvm):	17,5 µm
Средняя максимальная высота пика шероховатости	(Rpm):	13,9 µm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z):	31,3 µm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z ISO):	1,1 µm
Средняя максимальная высота профиля	(Rz):	28,9 µm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rz ISO):	31,4 µm
Коэффициент асимметрии	(Rsk):	-0,755
Эксцесс	(Rku):	3,718
Средняя волнистость	(Wa):	35,7 µm
Среднеквадратичная волнистость	(Wq):	45,2 µm
Максимальная высота волнистости	(Wy=Wmax):	314,3 µm
Максимальная высота профиля	(Pt):	321,0 µm

Пространственные

Средняя длина волны профиля	(λa):	13,2 µm
Среднеквадратичная длина волны профиля	(λq):	12,8 µm

Гибридные

Средний по модулю наклон	(Δa):	3,485
Среднеквадратичный наклон	(Δq):	4,669
Длина	(L):	141,1 µm
Длина растянутого профиля	(L0):	533,3 µm
Относительная длина профиля	(Lr):	4,570

Рис.3.15. Статистические данные шероховатости третьей партии образцов

Из расчетов шероховатости образцов второй группы выборки, очевидно, что поверхность имеет ровную структуру. Такая поверхность будет иметь хорошие свойства при работе устройства, и время гашения дуги будет наименьшим.

3.1.5 Обработка результатов сканирования рельефов поверхности электродов КДВ (после эксплуатации) с использованием программного обеспечения «Gwyddion»

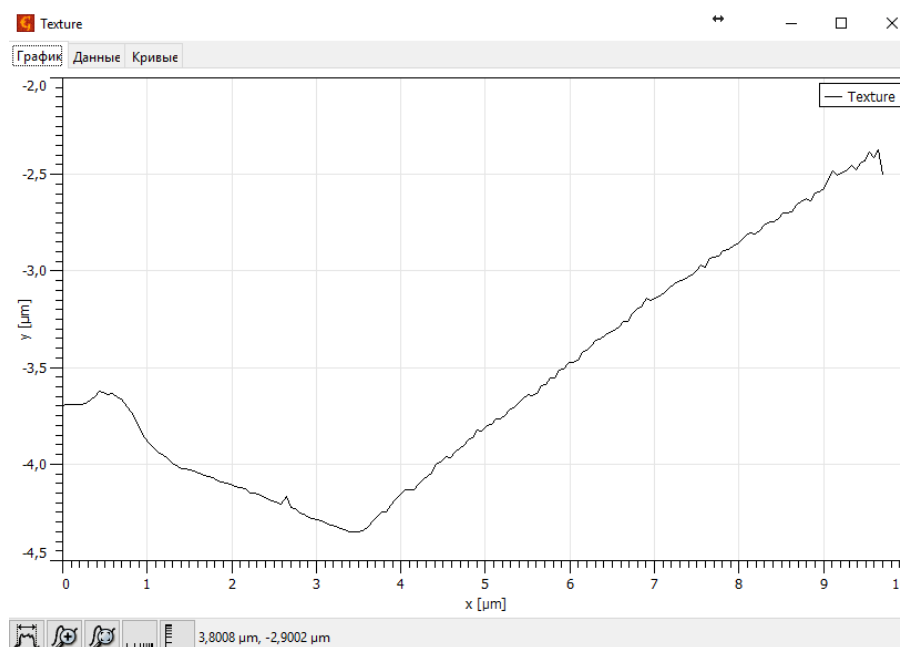


Рис.3.16. Шероховатость поверхности первой партии образцов

Параметры шероховатости

Файл: I:\образд\DropMDTFile1.mdt
 Канал данных: Рельеф ACM (1)

Выбранная линия: из (127, 0) в (0, 127) пикселей
 из (6,88, 0,01) в (0,02, 6,91) μm

Амплитуда	
Средняя шероховатость	(Ra): 0,032 μm
Среднеквадратичная шероховатость	(Rq): 0,041 μm
Максимальная высота шероховатости	(Rt): 0,210 μm
Максимальная глубина впадины шероховатости	(Rv): 0,104 μm
Максимальная высота пика шероховатости	(Rp): 0,106 μm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rtm): 0,124 μm
Средняя максимальная глубина долины шероховатости	(Rvm): 0,064 μm
Средняя максимальная высота пика шероховатости	(Rpm): 0,061 μm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z): 0,125 μm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z ISO): 0,011 μm
Средняя максимальная высота профиля	(Rz): 0,133 μm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rz ISO): 0,124 μm
Коэффициент асимметрии	(Rsk): -0,342
Эксцесс	(Rku): 2,921
Средняя волнистость	(Wa): 0,510 μm
Среднеквадратичная волнистость	(Wq): 0,588 μm
Максимальная высота волнистости	(Wy=Wmax): 7,851 μm
Максимальная высота профиля	(Pt): 7,915 μm
Пространственные	
Средняя длина волны профиля	(λ_a): 0,87 μm
Среднеквадратичная длина волны профиля	(λ_q): 0,77 μm
Гибридные	
Средний по модулю наклон	(Δa): 0,2338
Среднеквадратичный наклон	(Δq): 0,3361
Длина	(L): 9,76 μm
Длина растянутого профиля	(L0): 10,22 μm
Относительная длина профиля	(Lr): 1,081

Рис.3.17. Статистические данные шероховатости первой партии образцов

После прохождения полного эксплуатационного цикла поверхность образца претерпела существенные изменения. По полученным результатам анализа видна зависимость интенсивности воздействия плазменной дуги от шероховатости поверхности. Чем выше показатель шероховатости, тем большим рабочим ресурсом обладает вакуумная камера.

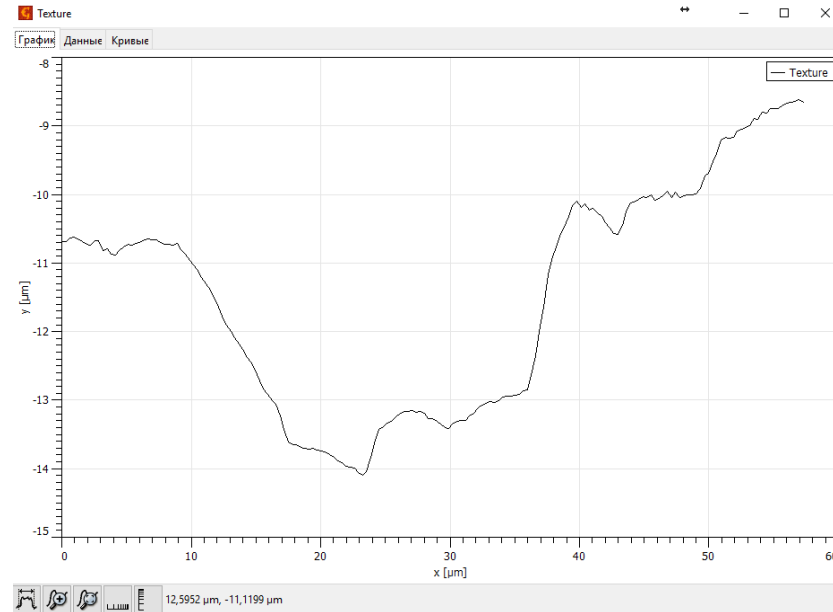


Рис.3.18. Шероховатость поверхности второй партии образцов

Параметры шероховатости

Файл: I:\образд\DropMDTFile0.mdt
 Канал данных: Рельеф ACM (1)
 Выбранная линия: из (0, 0) в (127, 127) пикселей
 из (0,1, 0,0) в (40,8, 40,8) μm

Амплитуда	
Средняя шероховатость	(Ra): 0,285 μm
Среднеквадратичная шероховатость	(Rq): 0,363 μm
Максимальная высота шероховатости	(Rt): 1,876 μm
Максимальная глубина впадины шероховатости	(Rv): 0,954 μm
Максимальная высота пика шероховатости	(Rp): 0,922 μm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rtm): 1,080 μm
Средняя максимальная глубина долины шероховатости	(Rvm): 0,594 μm
Средняя максимальная высота пика шероховатости	(Rpm): 0,487 μm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z ISO): 0,931 μm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z): 0,927 μm
Средняя максимальная высота профиля	(Rz ISO): 1,080 μm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rsk): 0,218 μm
Коэффициент асимметрии	(Rku): 3,089 μm
Эксцесс	(Wa): 1,402 μm
Средняя волнистость	(Wq): 1,611 μm
Среднеквадратичная волнистость	(Wu=Wmax): 25,368 μm
Максимальная высота волнистости	
Максимальная высота профиля	(Pt): 25,577 μm
Пространственные	
Средняя длина волны профиля	(λa): 9,8 μm
Среднеквадратичная длина волны профиля	(λq): 8,8 μm
Гибридные	
Средний по модулю наклон	(Δa): 0,1818
Среднеквадратичный наклон	(Δq): 0,2585
Длина	(L): 57,6 μm
Длина растянутого профиля	(L0): 59,4 μm
Относительная длина профиля	(lr): 1,042

Рис.3.19. Статистические данные шероховатости второй партии образцов

Сравнив результаты сканирования и расчеты шероховатости, получаем информацию, описывающую изменение структуры. Образование «ям» глубиной до 0,954 нм свидетельствует о неустойчивости состава контактов при

воздействия плазменной дуги. Такие дефекты понижают ресурс работы вакуумных камер, что может повлечь экономические затраты для заказчиков.

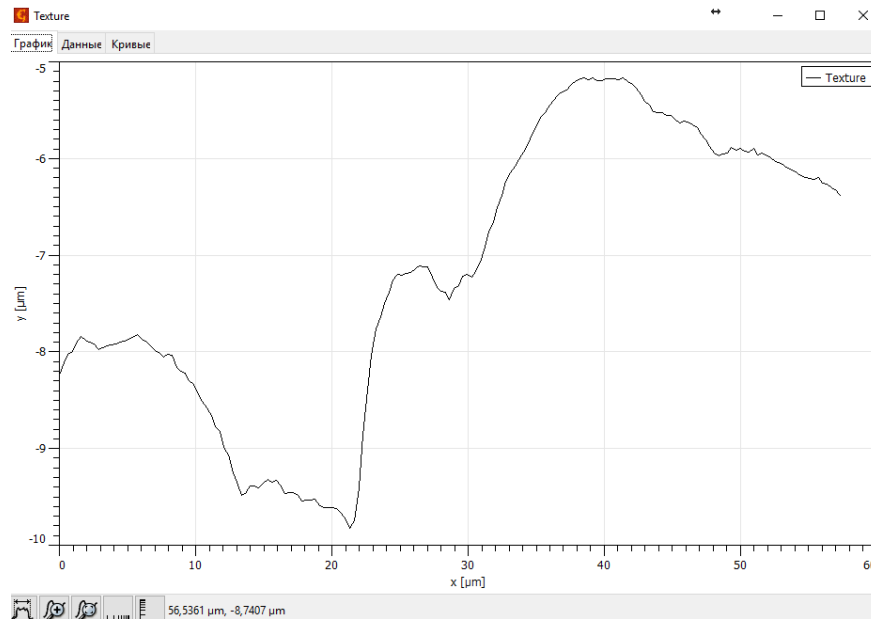


Рис.3.20. Шероховатость поверхности третьей партии образцов

Параметры шероховатости	
Файл:	I:\образд\обр3 2д.mdt
Канал данных:	Рельеф АСМ (1)
Выбранная линия:	из (0, 0) в (127, 127) пикселей из (0,2, 0,0) в (40,7, 40,8) μm
Амплитуда	
Средняя шероховатость	(Ra): 0,21 μm
Среднеквадратичная шероховатость	(Rq): 0,30 μm
Максимальная высота шероховатости	(Rt): 1,78 μm
Максимальная глубина впадины шероховатости	(Rv): 0,87 μm
Максимальная высота пика шероховатости	(Rp): 0,91 μm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rtm): 0,83 μm
Средняя максимальная глубина долины шероховатости	(Rvm): 0,45 μm
Средняя максимальная высота пика шероховатости	(Rpm): 0,38 μm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z): 0,63 μm
Среднее отношение высоты третьего по высоте пика к глубине третьей по глубине впадины	(R3z ISO): 0,02 μm
Средняя максимальная высота профиля	(Rz): 0,66 μm
Средняя максимальная высота шероховатости	(Rz ISO): 0,83 μm
Коэффициент асимметрии	(Rsk): 0,308
Эксцесс	(Rku): 4,704
Средняя волнистость	(Wa): 1,31 μm
Среднеквадратичная волнистость	(Wq): 1,43 μm
Максимальная высота волнистости	(Wy=Wmax): 16,62 μm
Максимальная высота профиля	(Pt): 16,99 μm
Пространственные	
Средняя длина волны профиля	(λa): 8,8 μm
Среднеквадратичная длина волны профиля	(λq): 7,7 μm
Гибридные	
Средний по модулю наклон	(Δa): 0,1535
Среднеквадратичный наклон	(Δq): 0,2458
Длина	(L): 57,6 μm
Длина растянутого профиля	(L0): 59,1 μm
Относительная длина профиля	(lr): 1,035

Рис.3.21. Статистические данные шероховатости третьей партии образцов

Проанализировав все полученные графические и расчетные данные можно сделать вывод, что технология обработки поверхности контактов выпускаемой продукции не до конца доработана. Существует множество микродефектов и неровностей.

Целесообразно будет включить в технологическую карту производства этап, связанный с обработкой поверхности контактов после их изготовления в вакуумных печах, где происходит спекание специального порошкового состава Cu-Cr. Для улучшения этого состава необходимо провести исследование процентного соотношения состава в таком сплаве. Данная работа позволит экономически и технически понизить затрачиваемые ресурсы на производство и обработку данной продукции, что в конечном итоге должно повысить качество выпускаемого готового изделия. Ресурс работы данной камеры в несколько раз повысит время межремонтных работ при эксплуатации.

3.1.6 Обработка результатов сканирования. Анализ хаотического рельефа и шероховатости поверхности

Деградацию поверхности под тепловым воздействием разряда можно разделить на две большие группы:

- 1) разрушение мелких дефектов (царапин, вкраплений и т.д.);
- 2) крупномасштабное плавление поверхностных участков (перемещение основных элементов в ходе плавления и испарения).

На основе применения методов атомно-силовой микроскопии [72] для анализа топографии полированной поверхности стеклокерамики обнаружено существование, по крайней мере, трех типов рельефа (рис. 3.22). В зависимости от особенностей воздействия на поверхность авторами работы были названы изотропным (а), зернистым (б) и анизотропным (в).

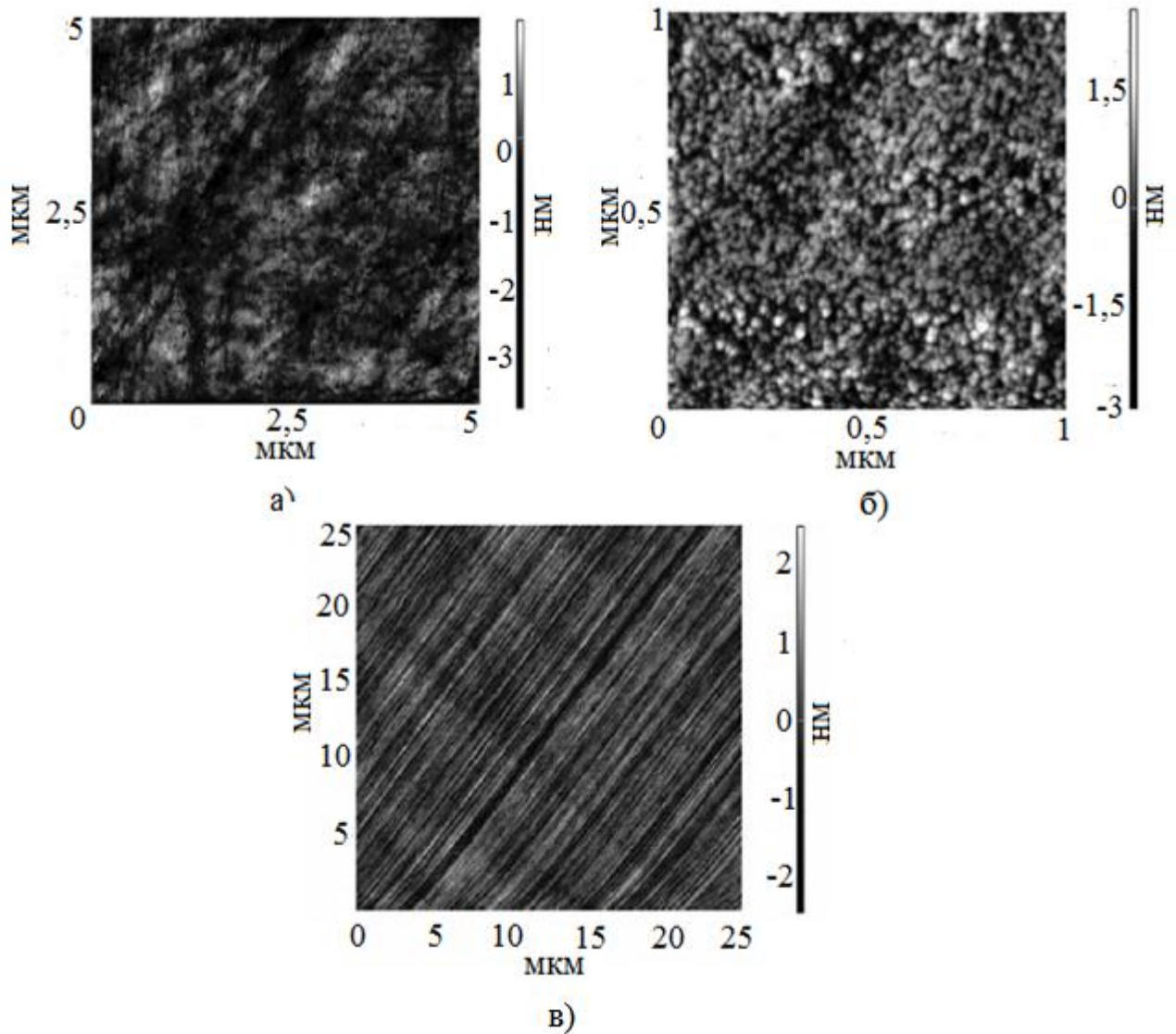


Рис.3.22. Изображения поверхности ситалловых подложек, полученные с помощью АСМ: а – изотропный, б – зернистый и в – анизотропный [72]

Проведя статистический анализ каждого их типов дефектов, можно определить, к какому роду деградации относится разрушение поверхности электродов в высоковольтных дугогасительных камерах.

Селекция по типам дефектов была осуществлена по алгоритму, предложенному в работе 72.

На рис. 3.23 представлена блок-схема алгоритма обработки АСМ-изображений поверхности, с помощью которого осуществляется разделение характерных особенностей рельефа. Исходной информацией являются

результаты АСМ-сканирования нескольких не перекрывающихся участков поверхности. На предварительной стадии обработки, чтобы удалить наклон изображения, осуществляется аппроксимация каждого скана плоскостью с помощью метода наименьших квадратов, которые затем вычитаются из сканов.

На первом этапе производится удаление уединенных выступов. Для этого осуществляется вейвлет-разложение по симметрам пятого порядка при шести уровнях декомпозиции. Полученные вейвлет-разложения подвергаются жесткой пороговой обработке.

После удаления слагаемых, идентифицированных с уединенными выступами, осуществляется обратное вейвлет-преобразование, результатом которого является трехмерное изображение шероховатого рельефа. Изображение уединенных выступов формируется путем вычитания шероховатого рельефа из АСМ-скана.

На втором этапе к изображению шероховатого рельефа применяется преобразование Радона, после чего подвергается вейвлет-разложению по вейвлетам Добеши третьего порядка при пяти (шести) уровнях декомпозиции. Коэффициенты, абсолютная величина которых выше порога, обнуляются. Далее осуществляется обратное преобразование Радона. В результате формируется изображение остаточного хаотического рельефа, исключение которого из шероховатого рельефа позволяет получить изображение линейно структурированных дефектов. Далее вычисляются спектральные плотности флуктуаций высоты, полученных трехмерных изображений характерных особенностей рельефа и производится их усреднение по АСМ-сканам. По результатам вычисленных значений спектральной плотности флуктуаций высоты для изображений выступов, линейно-структурированных дефектов и остаточного хаотического рельефа были вычислены значения его среднеквадратической шероховатости $\sigma_{\text{выст}}$, $\sigma_{\text{лсд}}$, $\sigma_{\text{хр}}$ соответственно.



Рис. 3.23. Алгоритм обработки изображения оптической поверхности [72]

Ниже представлены результаты по каждой группы образцов (до (таблицы 3.1 – 3.3) и после (таблицы 3.4 – 3.6) цикла тренировки).

Таблица 3.1

Статистические характеристики первой группы (до испытания)

<i>Номер подложки</i>	<i>Остаточный рельеф</i>				<i>Линейно структурированные дефекты</i>		<i>Выступы</i>	
	<i>схр+лсд, нм</i>	<i>схр, нм</i>		<i>σ_{тп}...max, нм</i>	<i>слсд, нм</i>	<i>σ_{тп}...max, нм</i>	<i>выст, нм</i>	<i>σ_{тп}...max, нм</i>
1	32,86	23,90		22.22 - 25.59	22,56	21.42 - 23.69	295,48	282.32 - 308.64
2	32,86	23,90		22.22 - 25.59	22,56	21.42 - 23.69	295,48	282.32 - 308.64
3	32,86	23,90		22.22 - 25.59	22,56	21.42 - 23.69	295,48	282.32 - 308.64
4	25,80	18,57		17.44 - 19.70	17,91	17.05 - 18.76	244,51	178.54 - 310.49
5	25,80	18,57		17.44 - 19.70	17,91	17.05 - 18.76	244,51	178.54 - 310.49
6	25,80	18,57		17.44 - 19.70	17,91	17.05 - 18.76	244,51	178.54 - 310.49

Таблица 3.2

Статистические характеристики второй группы (до испытания)

<i>Номер подложки</i>		<i>Остаточный рельеф</i>			<i>Линейно структурированные дефекты</i>		<i>Выступы</i>	
		<i>схр+лсд, нм</i>	<i>схр, нм</i>	<i>стип...тах, нм</i>	<i>слсд, нм</i>	<i>стип...тах, нм</i>	<i>выст, нм</i>	<i>стип...тах, нм</i>
1	34,48	22,90		21.41 - 24.39	25,77	24.84 - 26.70	304,80	302.29 - 307.30
2	34,48	22,90		21.41 - 24.39	25,77	24.84 - 26.70	304,80	302.29 - 307.30
3	34,48	22,90		21.41 - 24.39	25,77	24.84 - 26.70	304,80	302.29 - 307.30
4	24,77	21,19		20.16 - 22.23	12,82	12.36 - 13.29	297,93	288.40 - 307.46
5	24,77	21,19		20.16 - 22.23	12,82	12.36 - 13.29	297,93	288.40 - 307.46
6	24,77	21,19		20.16 - 22.23	12,82	12.36 - 13.29	297,93	288.40 - 307.46

Таблица 3.3

Статистические характеристики третьей группы (до испытания)

<i>Номер подложки</i>	<i>схр+лсд, нм</i>	<i>Остаточный рельеф</i>			<i>Линейно структурированные дефекты</i>		<i>Выступы</i>	
		<i>схр, нм</i>		<i>σ_{тп}...тах, нм</i>	<i>с_{лсд}, нм</i>	<i>σ_{тп}...тах, нм</i>	<i>выст, нм</i>	<i>σ_{тп}...тах, нм</i>
1	16,16	12,18		11.41 - 12.95	10,63	10.08 - 11.17	299,74	284.15 - 315.34
2	16,16	12,18		11.41 - 12.95	10,63	10.08 - 11.17	299,74	284.15 - 315.34
3	16,16	12,18		11.41 - 12.95	10,63	10.08 - 11.17	299,74	284.15 - 315.34
4	15,33	11,97		11.14 - 12.80	9,57	9.13 - 10.02	347,94	325.44 - 370.44
5	15,33	11,97		11.14 - 12.80	9,57	9.13 - 10.02	347,94	325.44 - 370.44
6	15,33	11,97		11.14 - 12.80	9,57	9.13 - 10.02	347,94	325.44 - 370.44

Таблица 3.4

Статистические характеристики четвертой группы (после испытания)

<i>Номер подложки</i>		<i>Остаточный рельеф</i>			<i>Линейно структурированные дефекты</i>		<i>Выступы</i>	
		<i>схр+лсд, нм</i>	<i>схр, нм</i>	<i>стип...тах, нм</i>	<i>слсд, нм</i>	<i>стип...тах, нм</i>	<i>выст, нм</i>	<i>стип...тах, нм</i>
1		40,17	20,44					
				19.34 - 21.54	34,58	34.01 - 35.15	315,18	274.50 - 355.87
2		40,17	20,44					
				19.34 - 21.54	34,58	34.01 - 35.15	315,18	274.50 - 355.87
3		40,17	20,44					
				19.34 - 21.54	34,58	34.01 - 35.15	315,18	274.50 - 355.87
4		25,10	15,89					
				14.54 - 17.23	19,43	18.12 - 20.75	560,16	345.45 - 774.88
5		25,10	15,89					
				14.54 - 17.23	19,43	18.12 - 20.75	560,16	345.45 - 774.88
6		25,10	15,89					
				14.54 - 17.23	19,43	18.12 - 20.75	560,16	345.45 - 774.88

Таблица 3.5

Статистические характеристики пятой группы (после испытания)

<i>Номер подложки</i>	<i>Остаточный рельеф</i>				<i>Линейно структурированные дефекты</i>		<i>Выступы</i>	
	<i>схр+лсд, нм</i>	<i>схр, нм</i>		<i>стип...тах, нм</i>	<i>слсд, нм</i>	<i>стип...тах, нм</i>	<i>выст, нм</i>	<i>стип...тах, нм</i>
1	20,77	13,34		12.14 - 14.54	15,93	15.31 - 16.54	326,23	322.19 - 330.26
2	20,77	13,34		12.14 - 14.54	15,93	15.31 - 16.54	326,23	322.19 - 330.26
3	20,77	13,34		12.14 - 14.54	15,93	15.31 - 16.54	326,23	322.19 - 330.26
4	28,00	20,97		19.95 - 21.99	18,55	17.90 - 19.19	281,92	245.43 - 318.41
5	28,00	20,97		19.95 - 21.99	18,55	17.90 - 19.19	281,92	245.43 - 318.41
6	28,00	20,97		19.95 - 21.99	18,55	17.90 - 19.19	281,92	245.43 - 318.41

Таблица 3.6

Статистические характеристики шестой группы (после испытания)

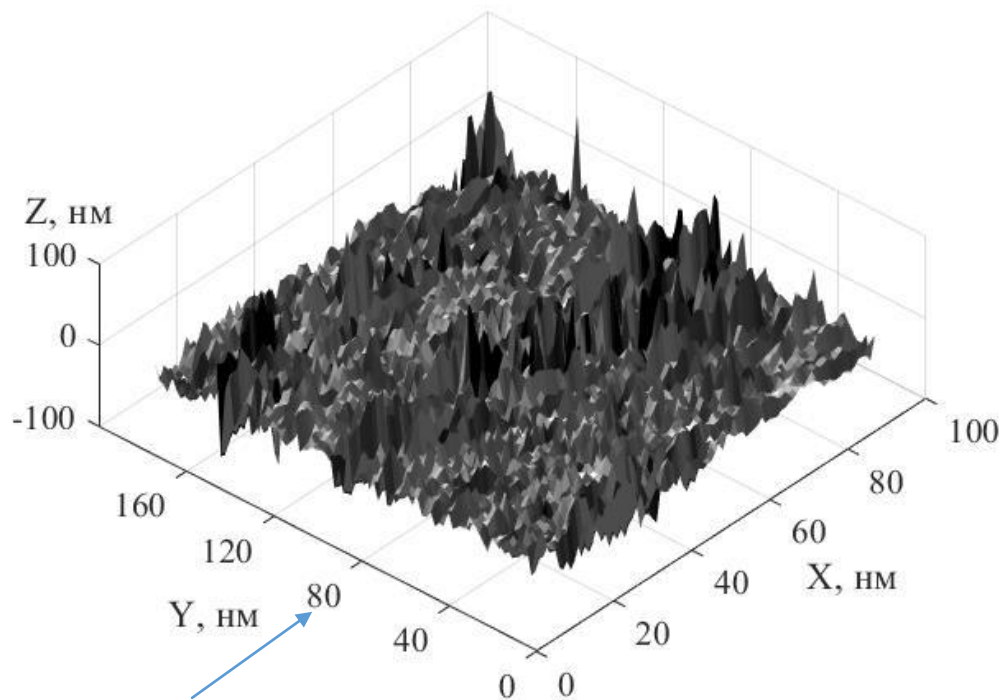
Номер подложки		Остаточный рельеф			Линейно структурированные дефекты		Выступы	
		<i>σ_{хр}</i> , нм	<i>σ_{хр}</i> , нм	<i>PSD</i> на низких частотах, нм ⁴	<i>σ_{лсд}</i> , нм	<i>σ_{лсд}</i> ...тах, нм	<i>выст</i> , нм	<i>σ_{лсд}</i> ...тах, нм
1	16,64	12,46		11.87 - 13.05	11,04	11.01 - 11.06	294,34	262.44 - 326.23
2	16,64	12,46		11.87 - 13.05	11,04	11.01 - 11.06	294,34	262.44 - 326.23
3	19,53	12,35		11.65 - 13.05	15,14	14.54 - 15.73	353,01	322.45 - 383.57
4	19,53	12,35		11.65 - 13.05	15,14	14.54 - 15.73	353,01	322.45 - 383.57
5	19,53	12,35		11.65 - 13.05	15,14	14.54 - 15.73	353,01	322.45 - 383.57
6	16,64	12,46		11.87 - 13.05	11,04	11.01 - 11.06	294,34	262.44 - 326.23

Таблица 3.7

Сводная таблица среднеквадратической шероховатости

Номер образца, №		Среднеквадратическая шероховатость, нм	
		Хаотический рельеф и царапины	Крупномасштабные дефекты
1	До испытания	29	270
2		30	301
5		16	323
3	После цикла испытаний	33	437
6		18	323
4		24	304

Из таблицы 3.7 и рисунков 3.24 – 3.26 видно, что данный случай разрушения поверхности относится ко второму типу деградации. Присутствует большое количество крупномасштабных (при данном коэффициенте увеличения) дефектов, которые говорят о том, что данные области подвергаются сильному перегреву, в результате которого и происходит разрушение.

**Рис. 3.24.** Изображение хаотического рельефа

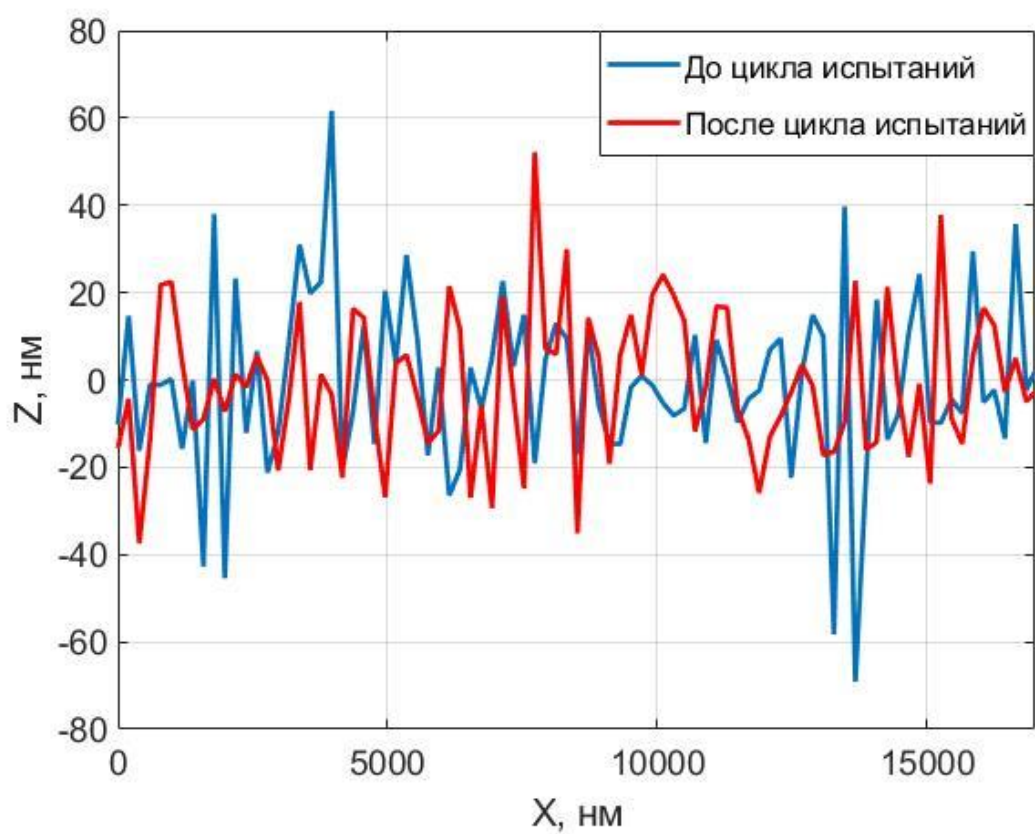


Рис. 3.25. Степень развитости рельефа

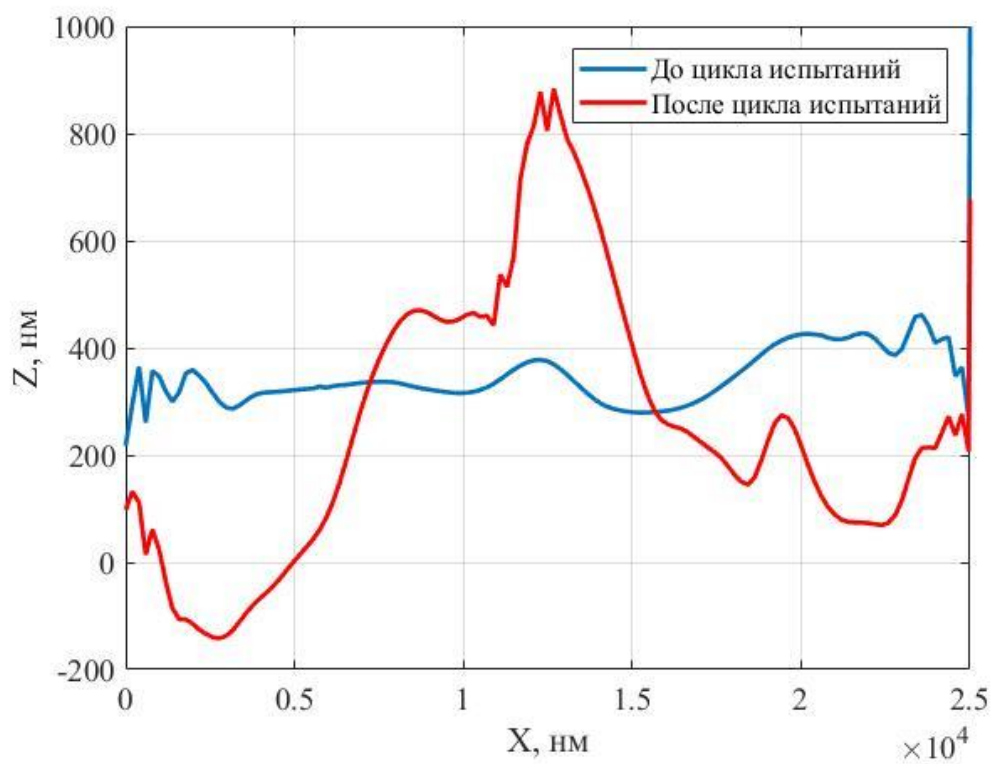


Рис. 3.26. Степень развитости рельефа

Исходя из этого видно, что образование слоя наплавления материала, его перемещение по поверхности электродов в процессе горения дуги, связано с перераспределением основных элементов многокомпозиционного сплава образцов. Это свидетельствует о том, что деградация связана с перемещением материала с одной части поверхности на другую.

3.2 Воздействие дугового разряда на поверхность электродов КДВ

Как известно, эмиссия электронов возникает при сообщении электронам дополнительной энергии (от внешнего источника) или созданы условия для их туннелирования. В обзоре «Эктон – лавина электронов из металла» Г.А. Месяцем [57] было описано явления возникновения пакетов электронов (кратковременных лавин), самостоятельно создающих условия для своей эмиссии. Это явление возникает из-за микровзрывов на поверхности катода (причиной служит высокая удельная энергия) и сильного перегрева металла.

Эктон сопровождается разнообразными явлениями: появлением плазмы, плавлением микроучастков катода, разбрызгиванием металла и т.д. Все они характеризуются большой концентрацией плазмы (до 10^{20} см^{-3}) в катодной части зоны эмиссии, сильной ее неоднородностью в малых объемах (10^{-12} см^{-3}), малым временем протекания процессов ($10^{-10} - 10^{-8} \text{ с}$), большой плотностью тока на катоде (10^8 А см^{-2}) и т.д.

Эмиссия электронов в этих процессах длится примерно $10^{-9} - 10^{-8} \text{ с}$, после чего прекращается из-за самоохлаждения. Для возбуждения эктона требуется большая удельная энергия (больше энергии сублимации (более 10^4 Дж г^{-1})). Явление образования эктонов схоже с электронной лавиной в газе. В обоих случаях за короткое время возникает большое число электронов и за короткое время происходит самоторможения роста электронов: в случае эктона — за счет охлаждения зоны эмиссии, лавины в газе — за счет роста поля положительного объемного заряда ионов.

Все эти открытия и обстоятельные исследования ВЭЭ и эктонов, успехи в разработке техники мощных наносекундных импульсов – все это позволило создать импульсные ускорители электронов с мощностью до 10^{13} Вт при длительности импульсов $10^{-10} - 10^{-6}$ с.

При исследовании ВЭЭ вакуумного разряда и дуги удалось практически доказать существование эктонов.

Во-первых, образование кратеров на поверхности катода. Образование кратера происходит со скоростью в интервале между скоростями теплопроводности и звука. Зная так же радиус кратера, получилось вычислить время жизни эктона ($10^{-9} - 10^{-8}$ с).

Во-вторых, зависимость структуры тока вакуумного разряда и времени. Как было доказано, если, к примеру, катод в форме иглы, а анод - плоский, то рост тока в вакуумном разряде будет достаточно плавным. Но если на поверхности анода появится отверстие, то ток за этим отверстием будет кратковременно увеличиваться в 2 - 3 раза по сравнению со средним. Это говорит о процессах появления и исчезновения электронов на катоде.

Третий аргумент - независимость удельных параметров от тока разряда. К примеру, скорость плазмы не зависит от тока (до начала начнется пинч-эффект). Сила на единицу тока, действующая на катод и число капель на единицу заряда, испускаемых катодом при вакуумной дуге, не зависят от тока.

В последнее время было множество работ по исследованию вакуумной дуги, ее свойств в зависимости от токов и материала электродов [22]. Как известно, при возникновении дуги в камере, контакты подвержены сильному нагреванию ($3000\text{ }^{\circ}\text{C}$) [41], в особенности поверхностные слои, что способствует мгновенному испарению материала с поверхности. Очевидно, что при температурах, в разы превышающие температуры плавления ($\text{Cu} - 1083\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{Cr} - 1615\text{ }^{\circ}\text{C}$) и испарении поверхностного слоя контакта, на электроде и в его объеме будут происходить необратимое изменение элементного состава. А это

в свою очередь будет влиять на работоспособность самой дугогасительной камеры.

Но перед этим давайте разберемся, какое воздействие оказывает дуга в вакуумном промежутке? В ряде работ установлено [86], что причиной начала перехода от тлеющего типа разряда в дуговую стадию и развитие дугового процесса обусловлено полевой эмиссией в зоне и в окрестности поверхности эмиттера с большими факторами усиления поля прикатодного падения напряжения. Электрическое поле этого падения напряжения концентрируется на малом межэлектродном пространстве дугового разряда примыкающего к катоду. Падение напряжения составляет величины порядка 10 - 20 В, поэтому напряженность электрического поля у катодов составляет величин порядка 10^5 В/см и более [86].

Формирование дуги обеспечивается превышением пороговых значений токов и напряжений для данных условий вследствие ионизации и зависит от параметров цепи и условий, а гашение дуги переменного тока достигается деионизацией плазмы между электродами и нулевыми мгновенными значениями тока в цепи дугового разряда. Высокая плотность тока приводит к разогреву центров эмиссии электронов вплоть до их плавления, что сопровождается ростом пара материалов контактов в межэлектродном пространстве и значительным нарастанием термоэлектронной составляющей тока (испускание электронов разогретой части поверхности катода).

Температуры анода и катода, амплитуда и длительности тока разряда - одни из причин износа контактов в процессе продолжительного горения дуги в условиях вакуума. В современных вакуумных дуговых выключателях в качестве контактных материалов активно применяются многокомпозиционные сплавы так как требования к ним настолько противоречивы, что такой пригодный для контактов однородный металл в природе отсутствует [87]. В настоящее время популярно применение, например, Cu – Cr сплава с объемной

концентрация меди составляющей порядка 60 % в объеме отливки, идущей для изготовления электродов. При казалось бы, значительной продолжительности исследования дугового разряда до сих пор малоизученны теплофизические процессы, в частности, на границе контактов и плазмы, что позволяет лишь делать оценки допустимых областей взаимосвязанных напряженностей полей, температур и плотностей токов (экспериментальные подходы таких вопросов ограничены, и дают приближенные результаты) [86].

3.3 Исследование поверхности электродов КДВ электронным микронзондовым анализом

Для сплавных композиций неизвестно, в частности, как изменяется морфология поверхности контактов и состав в условиях интенсивных энергетических потоков. Последнее определило направленность работы, в которой указанная сплавная композиция изучалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) и электронного микронзондового анализа (ЭМИ) совместно с растровым исследованием морфологии поверхности образцов с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV.

Нагрев зоны эмиссии рассчитать затруднительно из-за различия теплофизических свойств фаз в системе Cu – Cr сплава и их температурных изменений при фазовых превращениях, сопровождающих плавление и испарение, что затрудняет теоретический анализ. Поэтому было решено экспериментально исследовать особенности морфологии и состава данных образцов (электроды КДВ), как в растровом режиме, так и выбранных точек поверхности. С помощью изменения ускоряющего потенциала электронов зонда и, скрайбируя избранные участки поверхности, удалось заметить изменение концентрации основных и примесных составляющих контактов.



Рис.3.27. Электронный микроскоп JEOL JSM-6610LV

Растровый электронный микроскоп (типа JEOL JSM-6610LV) обеспечивал получение изображения микросканированием выбранных зон поверхности объекта с высоким (до 0,4 нм) латеральным разрешением, одновременно позволяя судить о ее составе и морфологии. В зоне анализа турбомолекулярный насос обеспечивал достижения вакуума 10^{-5} Па. Глубины сбора информации до 2 мк давали ускоряющие напряжения 30 кВ и до 0,6 мк при 15 кВ. Полученные результаты усреднялись программным обеспечением и представлены средними результатами этих измерений. Площадь поверхности сканирования 120x90 мк. Развитие дугового разряда на стадии инициирования дуги процессами автоэлектронной эмиссии обусловленной прикатодным полем и естественным рельефом поверхности после технологического температурного воздействием на вакуумный выключатель (операции пайки узлов, обезгаживание электродов и оболочки в вакуумной установке, тренировочными

подачами импульсов разрядного напряжения и т.п.) приводит к изменению морфологии и состава поверхности электродов.

На рис.3.28 представлен вид такой поверхности после скрабирования. Вне указанной области состав поверхности обусловленный действием нескольких технологических операций регистрировался в сканирующем режиме электронного микроскопа, а в таблице дано сравнение усредненного по поверхности и в объеме состава основных и примесных атомов. Видим, что концентрация атомов меди и кислорода на поверхности выше объемных значений, а концентрация атомов хрома уменьшилась на 10 %.

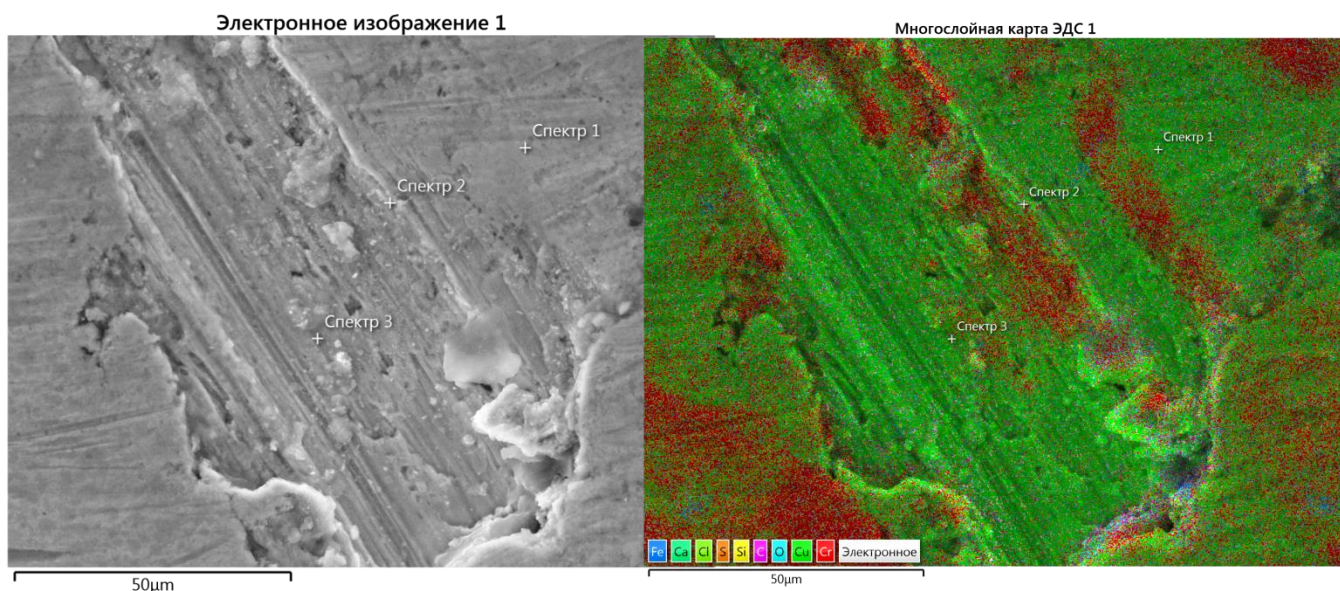


Рис.3.28. Вид и элементный состав поверхности в зоне скрайбирования: анализ велся вне ее (Спектр 1), на краю (Спектр 2) и на дне (Спектр 3)

Таблица 3.8

**Элементный состав исходного образца
и поверхности (по суммарной спектр карте)**

Элемент	Массив, %	Зона поверхности, %
Cu	60,5	64,8
Cr	39,5	28,3
O	< 0,05	4,9
N	< 0,004	< 0,004
H	< 0,002	< 0,002

В то же время при точечное сканирование (рис.3.29) выявило зоны процентное содержание меди, в которых снижается с увеличением глубины 92,4% - 87,4% - 78,2%, что указывает на резко выраженный процесс ее сегрегации к поверхности. Это можно объяснить меньшей температурой плавления меди (1085 °С по сравнению с температурой плавления хрома 1907 °С), которая перейдя в жидкое состояние «вытапливается» на поверхность в процессе расслаивания эвтектического сплава. Такой процесс предсказуем из равновесных диаграмм состояния, что несколько неожиданно для рассматриваемого неравновесного случая. Очевидно, что этому процессу способствует известный факт значительного увеличения на несколько порядков коэффициента диффузии (составляющего 10^{-5} - 10^{-4} см²/с). Рассеяние энергии идет по следующим каналам: часть энергии эмитируется при термоэлектронной эмиссии (эмиссии надбарьерных электронов [92, 100]), часть энергии идет на фазовые переходы первого рода (плавление и испарение), часть тепловой энергии уходит в объем электрода за счет теплопроводности.



Рис. 3.29. Зона плавления и разбрызгивания вещества электрода

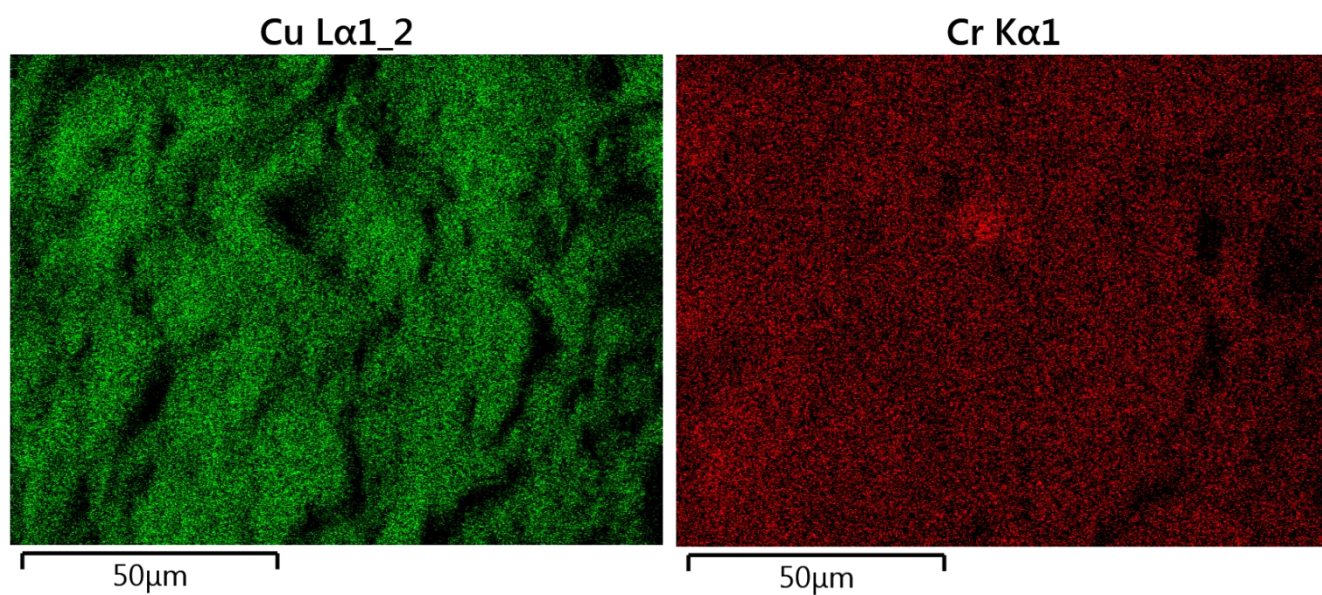


Рис. 3.30. Концентрации основных элементов зоны плавления

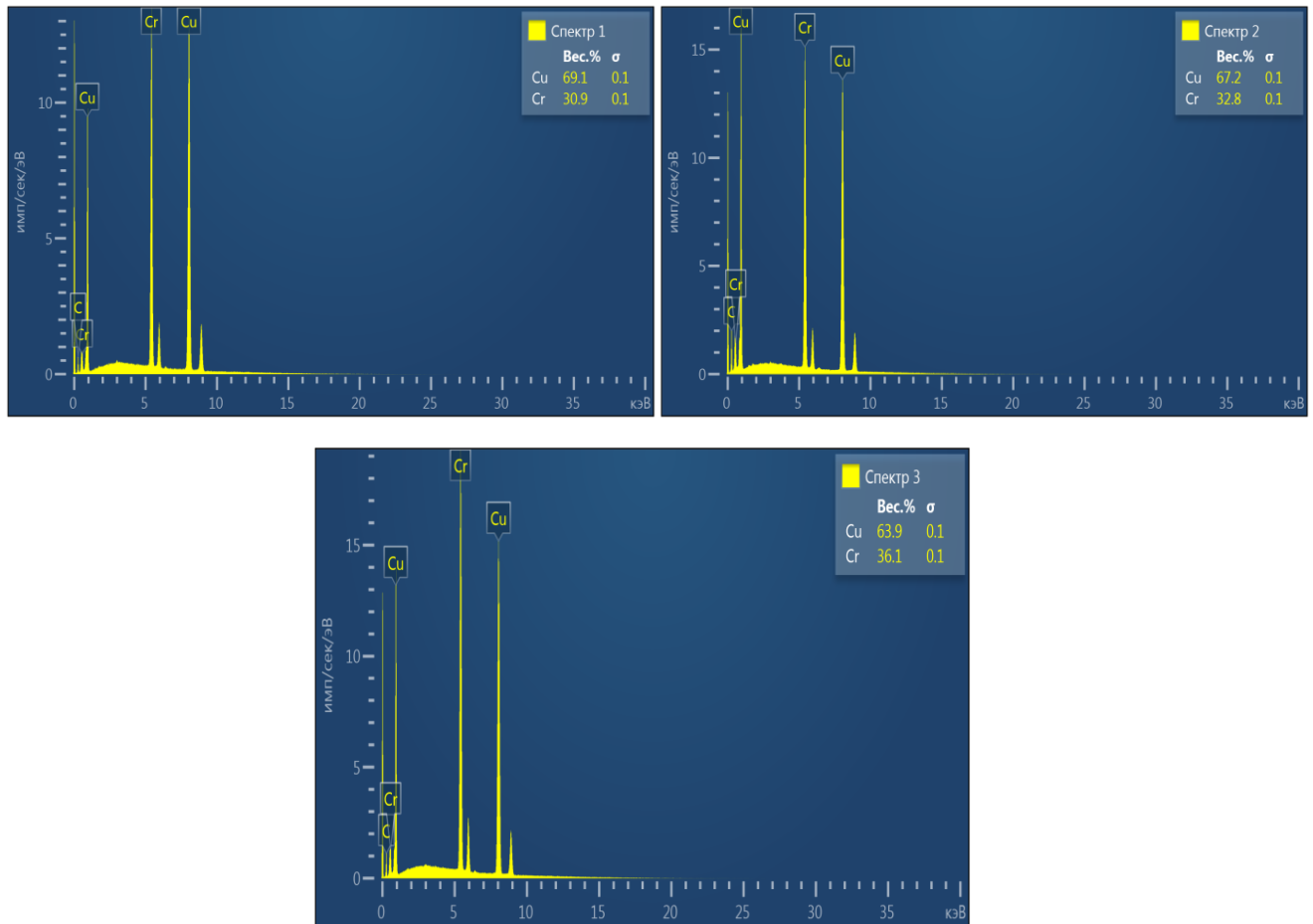


Рис. 3.31. Зона плавления и разбрызгивания вещества электрода

Наличие избыточной энергии приводит к взрыву перегретой области, при котором удаляется часть металла зоны расплавления.

Наиболее существенные изменения регистрируются в зонах оплавления, общий вид которой представлен на рис.3.30. Действительно, катодная область принимает несколько энергетических потоков за счет воздействия ионов, ускоренных в прикатодном пространстве. Кроме того, следует учитывать, что инициирующие дуговой раз автоэлектроны, которые создают в центрах эмиссии (выступах поверхности) высокие плотности тока также стимулирующие нагрев этой зоны. Энергия этих двух потоков вызывает резистивный нагрев зоны плавления. Изображение на рис.3.30 указывает плавления, что процесс плавления металлического сопровождается резким

увеличением объема приводящего к разбрызгиванию вещества. Отметим, что в зоне плавления концентрация кислорода уменьшилась более чем в два раз от значения 4,9 % и составила 2.2 %. Следовательно, результат напоминает случай вакуумной плавки, хотя не следует исключать сублимации окисных соединений. Присутствие избыточной энергии, сопровождающий перегревы расплавленных металлов объясняют, на наш взгляд, процесс разрушения катодных пятен. Распады катодных пятен происходят при превышении скорости поступления и отвода тепловой энергии.

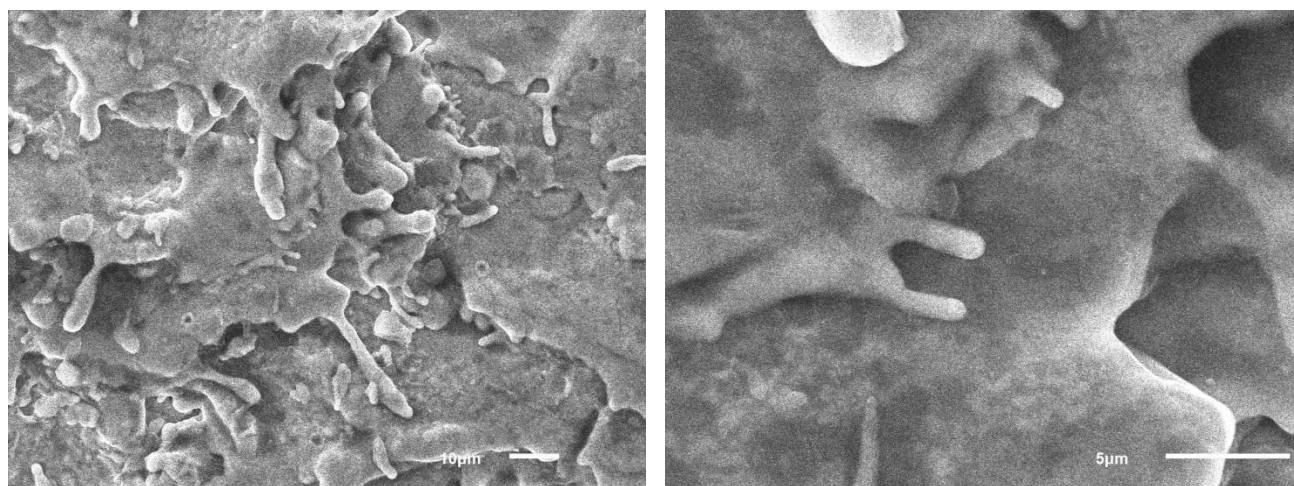


Рис.3.32. Морфология оплавленной зоны

Изучение морфологии поверхности показывает на ее крайне неоднородный характер, особенно в местах расплавления электродов, что подтверждают также данные по составу основных и сопутствующих примесей. Отмечается сегрегационный характер перераспределения компонент сплава в условиях технологического воздействия. В зоне расплавления электродов прослеживается перераспределение основных составляющих и значительное уменьшение концентрации кислорода.

Методами электронного микронзондового анализа обнаружено изменение состава хромо-медного электродного сплава по глубине в результате теплового

воздействия на всех этапах изготовления, тренировки и эксплуатации. Послойное измерение обнаружило уменьшение концентрации меди с увеличением глубины.

3.4 Термодинамика химических процессов в зоне взрывного плавления

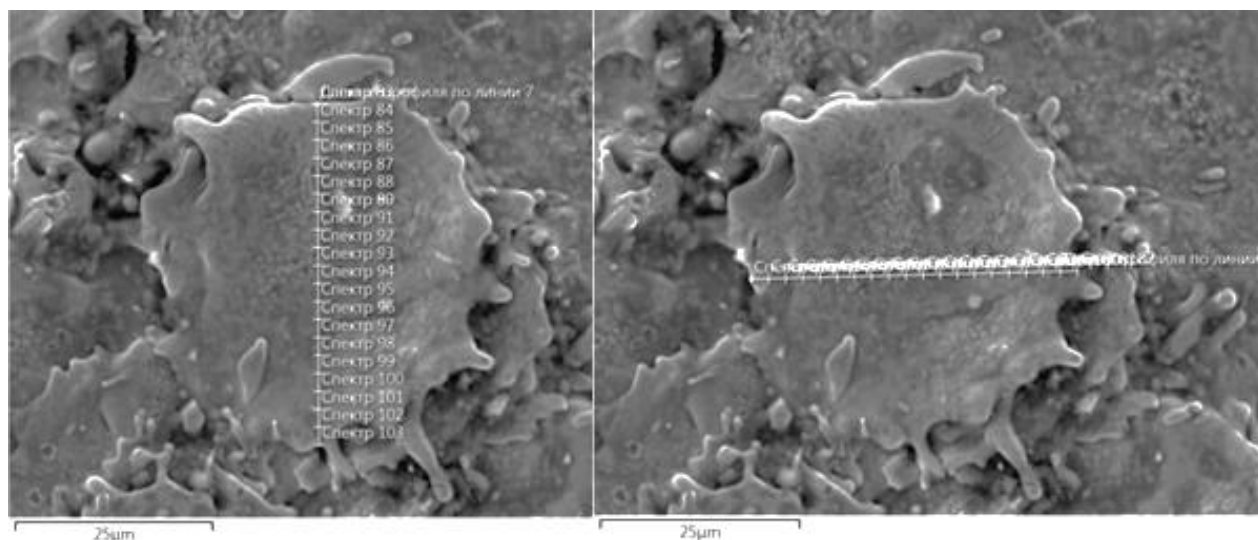


Рис. 3.33. Спектральный срез образца в зоне взрывного плавления

Как уже было выяснено, нагрев зоны эмиссии рассчитать затруднительно из-за различия теплофизических свойств фаз в системе Cu – Cr сплава и их температурных изменений при фазовых превращениях сопровождающих плавление, испарение и образование оксидов. Поэтому было решено экспериментально исследовать особенности морфологии и состава данных образцов. С помощью изменения ускоряющего потенциала электронов зонда удалось заметить изменение концентрации основных и примесных составляющих контактов. Однако для более подробного понимания процесса и его анализа было так же решено смоделировать распространение теплового потока в электроде. Учитывая параметры исследуемой вакуумной камеры (время воздействия дуги – 0,07 с) и удельную теплоемкость сплава

(279,73 Дж/кг*К), было смоделировано следующее распространение теплового потока в массиве исследуемого образца, представленное на рисунке 3.34.

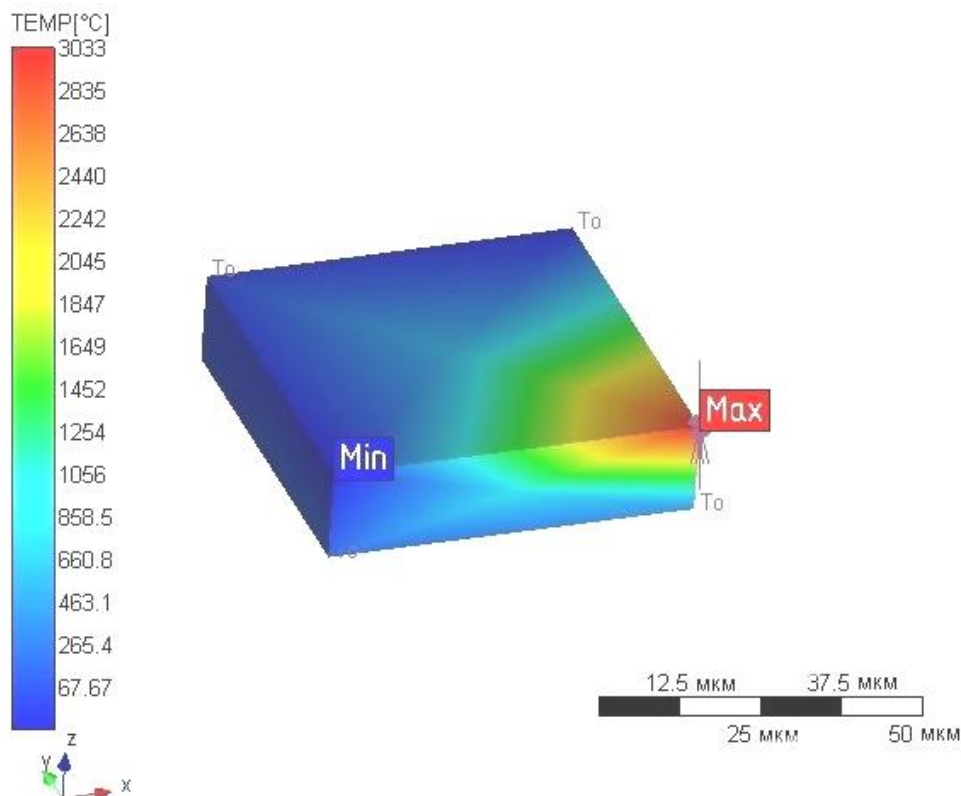


Рис. 3.34. Моделирование теплового потока в электроде

Глубина сканирования была установлена до 0,6 мк, путем подачи ускоряющего напряжения 15 кВ и до 2 мк при 30 кВ. Полученные результаты усреднялись программным обеспечением для каждого спектра сканирования и представлены средними результатами этих измерений. Как видно из результатов сканирования, в момент плавления происходит «растекание» меди от центра (точки воздействия плазменной дуги) к зонам с более низкой температурой. Это обусловлено физико-химическими свойствами металлов и их оксидов.

Таблица 3.9

**Процентное соотношение Си и Сг в образце
(вертикальный спектр)**

Расстояния между соседними спектрами $\div 2,27$ мкм (Рис. 4.28)

Спектр №	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102
Си, %	71,8	57,5	66,4	69,9	45,9	53,6	51,2	51,2	61,0	53,5	60,0	63,5	68,6	65,5	64,3	69,7	75,4	75,6	74,0	73,3
Сг, %	25,3	41,4	35,6	30,1	32,0	44,6	48,8	48,8	37,8	46,5	40,0	36,5	31,4	34,5	35,7	30,3	23,2	24,4	24,6	26,7

Таблица 3.10

**Процентное соотношение Си и Сг в образце
(горизонтальный спектр)**

Расстояния между соседними спектрами $\div 2,27$ мкм (Рис. 4.28)

Спектр №	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
Си, %	72,6	55,8	64,4	72,1	62,4	56,2	62,7	60,5	65,5	62,5	52,4	65,7	65,3	71,5	76,1	74,9	74,3	65,8	62,8	71,6
Сг, %	20,1	42,2	35,6	27,9	37,6	43,8	37,3	39,5	34,5	37,5	47,6	32,6	34,7	28,5	23,9	23,8	25,7	28,0	35,8	28,4

Такое распределение Си и Сг в процессе плавления было решено описать при помощи уравнения термодинамического потенциала или энергии Гиббса. Основной задачей явилось изучение возможных изменений указанных характеристик в условиях интенсивного и многократного воздействия плазменного разряда на электроды камеры.

Для определения теплового режима электродных материалов был проведен расчет распространения теплового фронта (изотермы T) из зоны воздействия дуги в объем электрода в соответствии с дифференциальным уравнением:

$$\Delta T - \frac{k}{c\rho} \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (3.1)$$

где k – коэффициент теплопроводности, c – теплоемкость вещества, ρ – плотность вещества, Δ – оператор Лапласа, t – время.

Начальные и граничные условия (3.1):

$$T|_{t=0} = T_0; \quad (3.2)$$

$$T|_{x=0} = T_0; \quad T|_{x=L} = T_L, \quad (3.3)$$

где x и l – координаты, T_0 и T_L – температуры на поверхности и на глубине материала электрода.

Энергия Гиббса, по своей сути равна полезной работе, способствующей образованию оксидов Cu и Cr при высокотемпературном плавлении электрода. Она отвечает за возможность и направление протекания химической реакции:

- при $\Delta H < 0$ и $\Delta S > 0$, $\Delta G < 0$ всегда и реакция возможна при любой температуре;
- при $\Delta H > 0$ и $\Delta S < 0$, $\Delta G > 0$ всегда и реакция невозможна;
- в остальных случаях знак ΔG (направление реакции) будет зависеть от соотношения ΔH и $T\Delta S$.

Таблица 3.11.

Основные термодинамические показатели элементов

Вещество	Формула	Реакция образования	Температура плавления, $T_{пл}, ^\circ\text{C}$	Стандартная энтропия, ΔS , Дж/(моль·К)	Стандартная энтальпия, ΔH , кДж/моль	Стандартная энергия Гиббса, ΔG , кДж/моль
Медь	Cu	-----	1085	33,1	0	0
Хром	Cr	-----	1857	23,6	0	0
Кислород	O ₂	-----	-218,8	205	0	0
Оксид меди (I)	Cu ₂ O	$4\text{Cu} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O}$	1229	92,9	-173,2	-150,5
Оксид меди (II)	CuO	$2\text{Cu} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CuO}$	1026	42,6	-162,0	-129,4
Оксид хрома (III)	Cr ₂ O ₃	$4\text{Cr} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3$	1990	81,2	-1140,6	-1059

Нас интересуют два основных элемента электрода (Cu и Cr), хотя в его составе присутствуют и другие примеси (O, N, H). Зная значения энтальпии и энтропии и используя уравнение (3.1), рассчитаем энергию Гиббса для образования основных оксидов Cu и Cr. Для ее расчета используется энтальпия и энтропия реакции, которые рассчитываются как сумма этих показателей до и после протекания реакции:

$$\Delta H_{\text{реакции}} = \sum H_{\text{конечные}}^0 - \sum H_{\text{начальные}}^0 \quad (3.4)$$

$$\Delta S_{\text{реакции}} = \sum S_{\text{конечные}}^0 - \sum S_{\text{начальные}}^0 \quad (3.5)$$

Далее эти значения подставляем в (3.1) и находим энергию Гиббса для возможных реакций образования оксидов (таблица 3.12).

Таблица 3.12.

Значения энергии Гиббса для различных температур

№	Реакция образования	Энергия Гиббса в нормальных условиях, ΔG , кДж/моль	Энергия Гиббса при температуре плазменной дуги, ΔG_{1000} , кДж/моль	Энергия Гиббса при температуре плавления, ΔG_{1358} , кДж/моль	Энергия Гиббса при температуре плазменной дуги, ΔG_{2130} , кДж/моль	Энергия Гиббса при температуре плазменной дуги, ΔG_{4000} , кДж/моль
1	$4\text{Cu} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O}$	-245,65	1,2	111,98	382,46	1349,6
2	$2\text{Cu} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CuO}$	-268,57	-138	-71,41	72,18	420
3	$4\text{Cr} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3$	-2118,19	-1734,2	-1538,37	-1116,09	93,2
4	$3\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 6\text{Cu}$	-741,49	-1026,7	-1171,94	-1485,14	-2243,8
5	$3\text{CuO} + 2\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Cu}$	-611,24	-659,6	-661,39	-665,25	-674,6

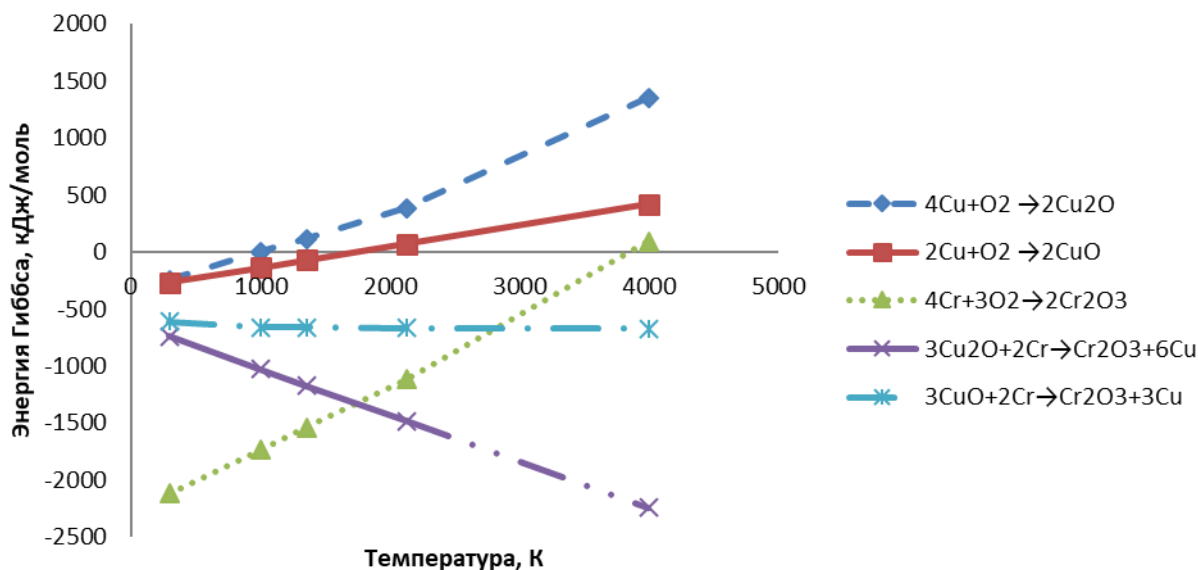


Рис.3.35. Зависимость энергии Гиббса вероятных химических реакций от температуры [95, 96]

Исходя из расчетов мы видим, что реакция образования №1 невозможна при высоких температурах. Это в свою очередь делает невозможным реакцию №4. И хотя энергия Гиббса для Cu меньше (реакция образования №2) по сравнению с Cr (реакция образования №3) в момент начала плавления электрода, нельзя забывать, что и температура плавления Cu ниже (1085 °C, против 1852 °C для Cr) и концентрация O₂ в составе низкая (÷5% на поверхности и менее 0,05% в массиве). В связи с этим, Cu раньше и в большей степени стремится к присоединению молекул кислорода, что объясняет выплавление Cu из объема электрода на поверхность. Как стало ясно из более ранних исследований [96, 97], концентрация O₂ в процессе деградации электрода снижается в 2 раза (с 5% до 2,2%). Это говорит о «выпаривании» O₂ из объема вследствие его синтеза с Cu при начале термохимических реакций с последующей диффузией на поверхность и разложением CuO при температуре близкой к 2000 °C. Это объясняет столь слабое взаимодействие Cr и O₂ при больших значениях свободной энергии Гиббса оксида хрома.

Получим, что из-за отсутствия свободного кислорода к моменту начала плавления Cr, реакция образования №3 будет невозможна.

Так же Cu обладает меньшим поверхностным натяжением по сравнению с Cr в жидком состоянии, что позволяет Cr, концентрируясь преимущественно к центру зоны плавления, выталкивает Cu на края этой зоны.

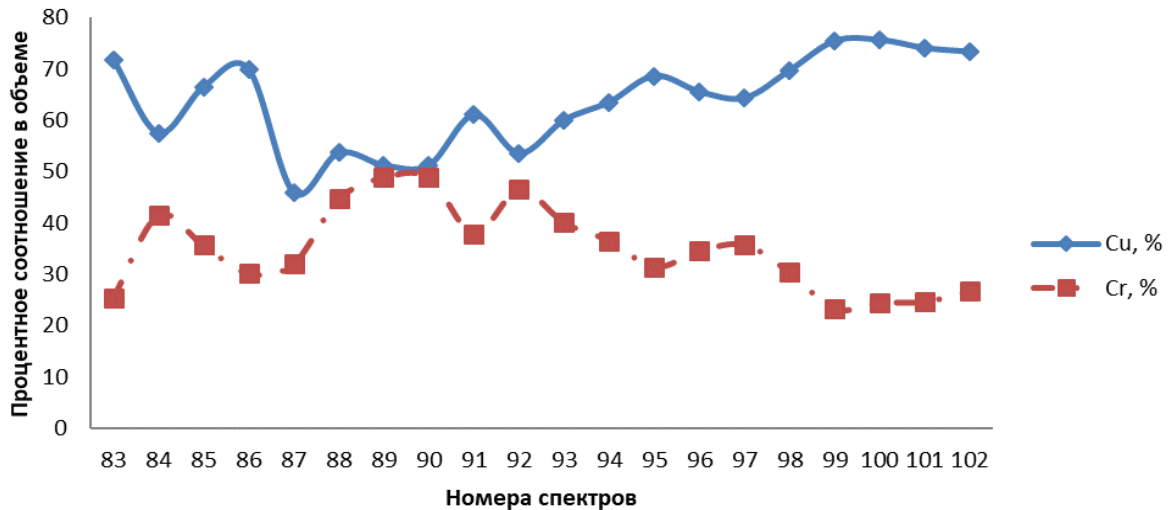


Рис. 3.36. Процентное соотношение Cu и Cr в объеме образца от верхней грани исследуемой области к нижней

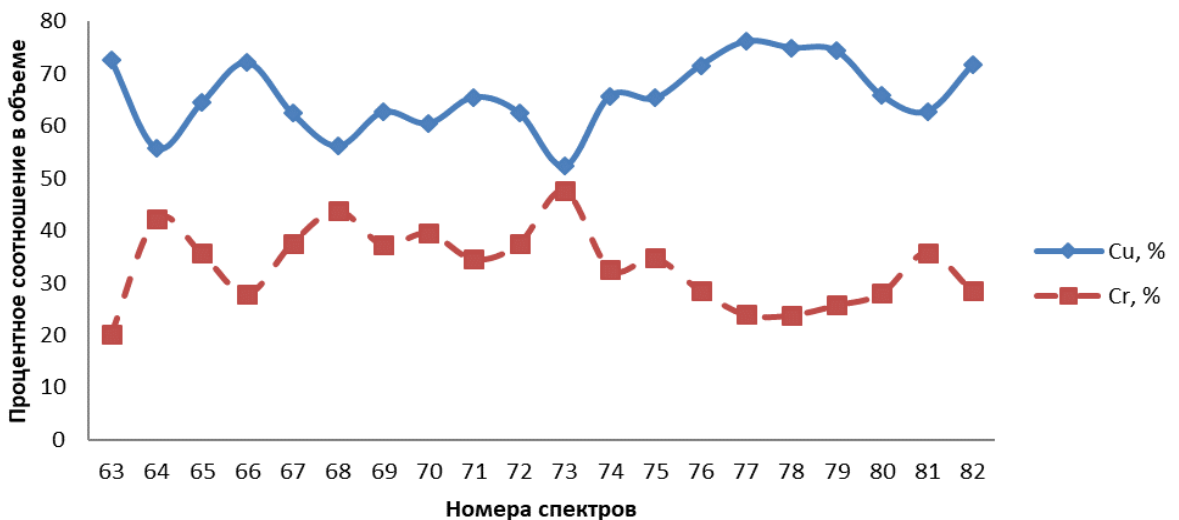


Рис. 3.37. Процентное соотношение Cu и Cr в объеме образца от левой грани исследуемой области к правой

3.5 Рекомендации по совершенствованию поверхности электродов КДВ для увеличения срока службы прибора

Повышение долговечности и улучшение эксплуатационных характеристик контактного материала возможно достичь путем внедрения дополнительных медных областей в структуру медно-хромовых контактов.

Существует множество технологий изготовления контактов дугогасительных камер. Один из предлагаемых способов изготовления контактов [Патент РФ 1352551, МПК Н 01 Н 33/664, 1987г] основан на кристаллизации сплава в отливках малых размеров, обеспечивающем повышение механической прочности, улучшение обрабатываемости заготовок, повышение коэффициента использования сплава до 0,9-0,95, а также снижение прочности сваривания контактов при коммутации.

Но данный способ не решает проблемы, обнаруженные при исследовании структуры и элементного распределения компонентов на поверхности контактов при плавлении под действием вакуумной дуги. Было обнаружено, что медь выходит из объема контакта и растекается от области воздействия дуги к зонам с более низкой температурой, это характерно для многокомпонентных сплавов и объясняется эффектом сегрегации одного из элементов, обладающем большим размером, и уменьшением поверхностной энергии. Это перераспределение негативно влияет на характеристики дуги.

Известен способ [Патент РФ 2063086, МПК 6 Н 01 Н 33/66, 1994г.], в котором технология изготовления контактов состоит из следующих этапов: - смешивание проводящего металлического порошка с термостойким порошковым материалом, имеющим более высокую температуру плавления, чем проводящий металлический порошок; - прессование полученной смеси, чтобы получить заготовку; - предварительное спекание заготовки в атмосфере высокочистого водорода; - окончательное спекание, уплотнение и обезгаживание заготовки диффузионной сваркой.

Недостатками данного способа изготовления контактов являются длительная термическая операция и закрытая пористость спеченной заготовки, в результате - низкое качество обезгаживания всего объема спеченного материала. Это влечет за собой увеличение эрозионных процессов, вследствие большего вкрапления примесей и газов в объем контактов дугогасительных камер.

Есть близкий к предыдущему способ изготовления контактов [Патент США 4723589 от 88.02.09, МПК В 22 D 23/00], в котором заготовку, изготовленную из материала, содержащего медь, сталь и керамику, устанавливают в вакуумную камеру против плазменного пистолета и подогревают с помощью плазмы. Затем в плазменный пистолет подают заданное количество по меньшей мере двух порошкообразных металлов из группы, в которую входят медь, хром, висмут и литий. Металлический порошок захватывается плазменной дугой и с большой скоростью направляется на поверхность заготовки. После удара о поверхность заготовки указанные металлы затвердевают и образуют безпористое покрытие.

Недостатками известного способа снова является возможность неравномерного распределения элементов вследствие их плавления. У них проявляется низкая прочность сцепления покрытия с подложкой и достаточно высокая остаточная пористость напыленного слоя в случае крупнозернистого порошка.

Способы с изменением структуры контакта тоже широкоизвестны. Контакт содержит контактную поверхность [Патент СССР SU 1690017 A1, Н 01 Н 33/66, 1989г.] из тугоплавкого пресс-порошкового материала (сплав: железо-медь-висмут), на которой выполнены кольцевые канавки, заполненные легкоплавким материалом (сплав: висмут-медь) с малым током среза. Покрытие контактирующей поверхности с канавками слоем молибдена или другого указанного металла позволяет исключить выпотевание легкоплавкого

компонента на поверхность контакта, а также исключить перетекание из каналов легкоплавкого компонента на поверхность контакта и проникновение его через тугоплавкий материал, что возможно в процессе пайки контактов.

Недостатком данного способа является ухудшение характеристик вакуумной дуги. Давно показано, что наибольшую эффективность обладает контакт сплавной системы медь-хром, и добавление дополнительных элементов будет негативно влиять дугу.

Решение проблемы неравномерного перераспределения элементов в объеме и на поверхности контакта с сохранением характеристик вакуумной дуги может являться следующий способ изготовления контактов.

Для поддержания равномерных областей концентрации атомов меди на поверхности предлагаются несколько способов. Первый заключается в создании подслоя из меди (дельта-слоя), который уже будет покрываться сплавом медь-хром, не нарушая рекомендуемый состав и концентрацию элементов на поверхностном слое контакта. Дельта-слой наносится напылением или литографией. Второй – путем литографии получить «колодцы» (углубления), заполненные медью, и также накрыть эту область сплавной системой медь-хром.

Можно предложить несколько видов структуры электродов: отличающийся тем, что имеет равномерный, полностью заполненный подслой; отличающийся тем, что подслой выполнен в виде сетки; отличающийся тем, что подслой представлен множеством колец разного диаметра с общим центром; отличающийся тем, что подслой представлен фрактальными структурами любого вида; отличающийся тем, что подслой представлен «колодцами», заполненными медью.

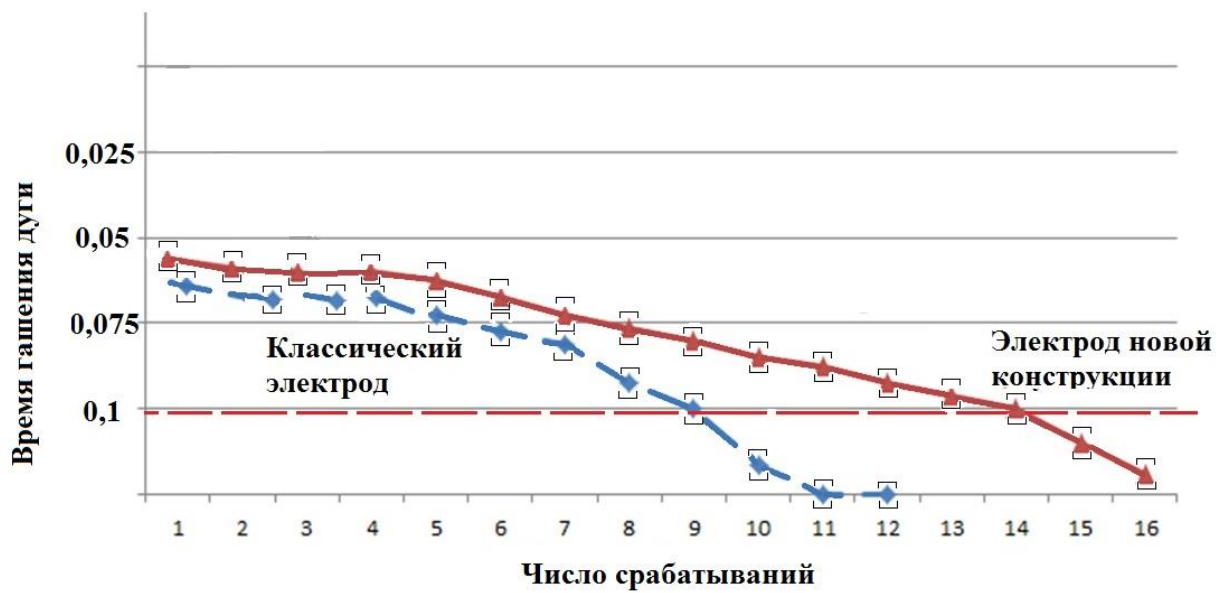


Рис. 3.38. Испытание образцов КДВ-110 на срок службы

Данные меры обеспечат поступление дополнительных атомов меди за счет сегрегации в процессе расплавления поверхностного слоя и концентрирование меди на поверхности в зонах с более низкой температурой (по сравнению с точкой воздействия вакуумной дуги).

3.6 Выводы по III главе

1. Впервые обследована технология изготовления серийных КДВ.
2. Получено представление об особенностях изменения морфологии и элементного состава электродов вакуумных прерывателей с использованием аналитического оборудования непосредственно в ходе технологического процесса.
3. Проведен с помощью методов атомно-силовой микроскопии, электронного микронзондового анализа и растровой электронной микроскопии

сопоставительный анализ состояний контактирующих материалов на основе металлокерамической композиции Cr-Cu до и после испытаний.

4. 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.

5. Показано, что при возникновении вакуумной дуги, 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.

6. 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. Предложены рекомендации по совершенствованию состава электродов высоковольтных КДВ служат для повышения надежности работы вакуумной дугогасительной камеры на основе модифицирования поверхности контактов с помощью дополнительных объемов меди.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплекса теоретических и экспериментальных исследований в диссертационной работе получены очень важные научные и практические результаты. Среди них хочется выделить следующие:

1. Проведена модернизация конструкции ряда типов КДВ, в ходе которой из состава прибора исключен штангель 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 проволочным 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 объём 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 °С) температуре 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 микронзондового 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.

Результаты, полученные в ходе исследования, используются на предприятии ООО «Вакуумные технологии», что подтверждено актом о внедрении (Приложение А), и в образовательном процессе ФГБОУ ВО РГУ имени С.А. Есенина (Приложение Б).

Апробация результатов исследования:

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)/ 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/ 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 – Том 10 – №4 – С. 92–98.
3. Кудюкин А.И. Модификация поверхности электродов в вакуумной дуге в зоне взрывного плавления/ А.И. Кудюкин, М.Н. Махмудов, Е.Н. Моос, В.А. Степанов // Изв. РАН. Сер. физ. – 2020 – Том 84 – № 6 – С.898-901.
4. Kudyukin A.I. Electrodes of a Vacuum Chamber under the Action of an Arc in the Explosive Melting Zone/ A.I. Kudyukin, M.N. Makhmudov, E.N. Moos, V.A. Stepanov // Technical Physics – 2020 – Volume 65 – P. 1163–1166.
5. Kudyukin, A. Surfaces of cohesive bonds' fracture in the multilayer systems: A comparative analysis. / 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/ 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/ 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/ 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/ 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/ 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/ 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/ 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/ 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/ 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/ 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/А.И. Кудюкин // Труды XXV Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». – 2019.
12. Кудюкин А.И. Анализ распыленных и осажденных частиц при производстве вакуумных дугогасительных камер квадрупольными системами/ 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/ 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/ 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/ 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/ 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 / 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/ 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/ 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/ А.И. Кудюкин// Труды Международной Тулиновской конференции ФВЗЧК- 2023. – 2023. – С. 52.

Библиографический список

1. Авилкина В.С., Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Виргильев Ю.С., Машкова Е.С., Шульга В.И. // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2012. № 3. С. 24.
2. Адоньев Н.М. Справочник по расчету и конструированию контактных частей высоковольтных электрических аппаратов / под ред. В. В. Афанасьева .— Л. : Энергоатомиздат : Ленингр. отд-ние. 1988. 382 с.
3. Александров Г.Н., Иванов В.Л. Изоляция электрических аппаратов высокого напряжения. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — 208 с.
4. Александров Г.Н. Теория электрических аппаратов: Учеб. для вузов / под ред. Г. Н. Александров. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб. : Издво СПбГТУ. 2000. 539 с.
5. Александров Г.Н. // ЖТФ. 2006. Т.76, вып.12. С.32.
6. Александров Г.Н. Электрические аппараты высокого напряжения: учебник для вузов по специальности "Электрические и электронные аппараты" / под ред. Г. Н. Александрова. — Изд. 2-е, доп. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та. 2000. 496 с.
7. Андрианова Н. Н., Борисов А. М., Виргильев Ю. С., Машкова Е. С., Севостьянова В. С. Известия РАН, Серия Физическая. 2014. Т. 78. № 6. С. 723.
8. Арустамов В.Н., Ашуров Х.Б., Миркаримов А.М. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. №11. С. 95.
9. Арушанов К.А., Зельцер И.А., Карабанов С.М., Майзельс Р.М., Маслаков К.И., Моос Е.Н., Наумкин А.В. Ионно-индуцированное модифицирование контактных поверхностей // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 6. С. 750.

10. Балабанов Ю.В. Разработка вакуумного выключателя, 220 кВ 31,5 кА. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, 2014.
11. Беграмбеков Л.Б. Модификация поверхности твердых тел при ионном и плазменном воздействии. М.: МИФИ, 2001. 34 с.
12. Беграмбеков Л.Б. Процессы в твердом теле под действием ионного и плазменного облучения. М.: 2008. 196 с.
13. Белкин Г.С., Лугацкая И.А., Перцев А.А., Ромочкин Ю.Г. Новые разработки ВЭИ в области вакуумных дугогасительных камер / Сборник статей сотрудников ВЭИ им. В.И. Ленина «Вакуумные дугогасительные камеры». 2008. С.365.
14. Белкин Г.С., Лукацкая И.А. Исследование свариваемости контактов вакуумных дугогасительных камер/ Сборник статей сотрудников ВЭИ им. В.И. Ленина «Вакуумные дугогасительные камеры». 2008. С.130.
15. Бер Б.Я., Воронин А.В., Александров А.Е., Брунков П.Н., Борматов А.А., Гусев В.К., Демина Е.В., Новохацкий А.Н., Павлов С.И., Прусакова М.Д., Сотникова Г.Ю., Яговкина М.А. Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 3. С. 51.
16. Богомолова Л.Д., Борисов А.М., Красильникова Н.А., Куликаускас В.С., Машкова Е.С., Экштайн В. Известия РАН, Серия Физическая. 2002. Т. 66. С. 551.
17. Болховитянов Ю.Б., Гутаковский А.К., Дерябин А.С. // ФТП. 2008. Т. 42. Вып.1. С.3.
18. Бондарева А.Л., Змиевская Г.И. Моделирование флуктуационной стадии высокотемпературного блистеринга // Известия РАН. Серия физическая. 2004. Т. 68. № 3. С. 336.
19. Борисовский П.А., Киселев Г.В., Киселева Л.И. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. №5. С. 82.

20. Бучин В. А., Зерцер М. П. Журнал технической физики. 1990. Т.60. № 4. С. 92.
21. Вакуумные выключатели. Элегаз против вакуума [Электронный ресурс] – URL: <http://forca.ru> (дата обращения: 20.06.2017). – Текст: электронный.
22. Вакуумные дугогасительные камеры. Сборник статей сотрудников ВЭИ. Составители А.А. Перцев, Л.А. Рыльская Рязань: Рязанский издательский дом, 2008. - 392 с.
23. Вакуумные выключатели на номинальные напряжения 110 и 220 кВ. Типовые технические требования. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». дата введения: 11.03.2014. 30 с.
24. Вакуумные выключатели типа ВРС-110. Руководство по эксплуатации. 2011. 33 с.
25. Визир А.В., Окс Е.М., Шандриков М.В. и др. // ЖТФ. 2017. Т. 87. №3. С. 356.
26. Воронин А.В., Александров А.Е., Бер Б.Я. и др. // ЖТФ. 2016. Т.86. № 3. С. 51.
27. Гаврилов С.В., Моос Е.Н. Появление структурных особенностей на потенциальном барьере // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 2. С. 225.
28. ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ.
29. ГОСТ 1516.3-96 Электрооборудование переменного тока на напряжения от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции.
30. Граков В.Е. ЖТФ, XXXVII, 396,1967.
31. Грошковский Я. Техника высокого вакуума / Я. Грошковский. - М.: Мир, 1975. - 622 с.
32. Гринфельд М.А. // ДАН СССР. 1972. Т. 290. С. 1358.
33. Гусев В.М., Гусева М.И., Мартыненко Ю.В. и др. В материалах V Всесоюз. конф. «Взаим. атом. част. с тверд. телом» ч.1, 1978. С.34.

34. Данилов М.Е. Влияние материала контактов на отключающую способность дугогасительной камеры // Сборник статей сотрудников ВЭИ им. В.И. Ленина «Вакуумные дугогасительные камеры». 2008. С. 68.
35. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука. 1966. 564 с.
36. Дубовик А.С., Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. Изд. Наука, 1964.
37. Дугогасительные устройства выключателей высокого напряжения : учебное пособие для вузов по направлению подготовки магистров "Техническая физика" / Е. Н. Тонконогов ; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет .— СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2011 .— 202 с. 102.
38. Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. №1. С. 15.
39. Ерошкин М.В., Киселев Г.В., Моос Е.Н. Распыление поверхности катода He-Ne лазера // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 6. С. 686–689.
40. Зельцер И.А., Кукушкин С.А., Моос Е.Н. Характеристики ионной и электронной эмиссии при модуляции потенциального барьера // Известия РАН. Серия физическая. 2008. Т. 72. № 7. С. 873.
41. Зекцер М.П., Бучин В.А. Эффект плавления катода в области пятна вакуумной дуги. ЖТФ. 1990 том 60. №4. С. 92-98.
42. Источники финансирования предприятия [Электронный ресурс] – URL: [http:// grandars.ru](http://grandars.ru) (дата обращения: 15.08.2016). – Текст: электронный.
43. Казаков А.В., Медовник А.В., Бурдовицин В.А. и др. // ЖТФ. 2015. Т. 85. №2. С. 55.
44. Капцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. - М.: Наука.1950. С.145.
45. Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. Изд. «Наука», 1968.

46. Киреев В.А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. М.: Химия. 1970. С. 62.
47. Клярфельд К.Н., БД. Соболев. ЖТФ, XVII, 319, 1947.
48. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии. М.: Бином, 2003, 493 с.
49. Лиу, J. Wang, С. Xiu, З. Ванг, Развитие высоковольтных вакуумных выключателей в Китае. 2007. № 4. С. 856.
50. Лозанский Э.Д. //УФН. 1975. Т.117, вып.3. С.62.
51. Лукацкая И.А. Исследование коммутационного ресурса вакуумных дугогасительных камер/ Сборник статей сотрудников ВЭИ им. В.И. Ленина «Вакуумные дугогасительные камеры». 2008. С.126.
52. Лукацкая И.А. Начальная стадия вакуумной дуги отключения / Сборник статей сотрудников ВЭИ им. В.И. Ленина «Вакуумные дугогасительные камеры». 2008. С.18.
53. Лукацкая И.Л.. Proc of the VII Intern. Conf. on Phen. in Ioniz Gases, Beograd, 1,412,1966.
54. Луфт Б.Д., Шустина А.Л. Очистка деталей электрических приборов// М.: Энергия, 1968. 268 с.
55. Лыков, А.В. Теория теплопроводности: Учеб. пособие для вузов / Лыков А.В. — Москва : Высш.шк. 1967. 599 с.
56. Лыков А.В. Теплопроводность нестационарных процессов. Госэнергоиздат, 1948.
57. Месяц Г.А. Эктон — лавина электронов из металла, УФН, 165:6 (1995), 601–626; Phys. Usp., 38:6 (1995), 567–590.
58. Николаев А.Г., Окс Е.М., Фролова В.П. и др. // ЖТФ. 2017. Т. 87. №5. С. 681.
59. Николаев А.Г., Окс Е.М., Юшков Г.Я. // ЖТФ. 1998. Т. 68. №5. С. 39.

60. Обзоры в рубрике «Бизнес-план» [Электронный ресурс] – URL: <http://bishelp.ru> (дата обращения: 15.08.2016). – Текст: электронный.
61. Патент на изобретение №2532627. Способ изготовления вакуумных дугогасительных камер (ДВК) / Г.С. Белкин, Л.Н. Васецова, В.Г. Горохова, Ю.Г. Ромочкин; опубл. 24.11.2012.
62. Петров Н.Н., Аброян И.А. Диагностика поверхности с помощью ионных пучков. Л.: Изд. Лен. унив. 1977. 160 с.
63. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенчко Е.А. Конструирование и расчет вакуумных систем. - М.: Энергия, 1979. - 504 с.
64. Пипко А.И., Плисковский В.Я., Пенченко Е.А.; П 32 Конструирование и расчет вакуумных систем, М., «Энергия», 1970. 504 стр с илл.
65. Плешивцев Н.В. Катодное распыление. М.: Атомиздат. 1968. 347 с.
66. Проектирование электрических аппаратов: Учебник для вузов/ Г.Н. Александров, В.В. Борисов, Г.С. Каплан и др.; Под ред. Г.Н. Александрова – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.
67. Процессы столкновений в ионизированных газах / Арцимович Лев Андреевич, Мак-Даниель И. «Мир», 1967 г.
68. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Под ред. Р. Бериша. М.: 1986.
69. Репин П.Б., Егоров Н.В. // ЖТФ. 2015. Т.85. № 2. С. 48.
70. Родштейн Л.А. Электрические аппараты: Учебник для техникумов / Родштейн Л.А. — 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоиздат : Ленингр. отделение. 1981. 303 с.
71. Селикатова С.М., Лукацкая И.А. Начальная стадия вакуумной дуги отключения// Сборник статей сотрудников ВЭИ им. В.И. Ленина «Вакуумные дугогасительные камеры». 2008. С. 18.

72. Серебряков А.Е. Анализ трехмерных изображений нанорельефа оптических поверхностей: дис.канд. техн. наук. Рязанский государственный радиотехнический университет. Рязань, 2015.
73. Смоланов Н.А. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. №6. С. 83.
74. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения/ Под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 544 с
75. Строкань Г.П. Процессы разрушения поверхности электрода в плазме высокочастотного разряда // ЖТФ. 2001. Т. 71. № 9. С.112.
76. Тахистов В.В., Пономарёв Д.А. Органическая масс- спектрометрия. СПб.: ВВМ, 2005, 346 с.
77. Теплопередача: Учебник для теплоэнерг. спец. втузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва: Энергоиздат. 1981. 417 с.
78. Техническая коллекция Schneider Electric. Отключение электрического тока в вакууме. март 2008. №15. 33 с.
79. Физические и технологические факторы, определяющие коммутационный ресурс и эффективность производства вакуумных дугогасительных камер [Электронный ресурс] – URL: <http://tekhnosfera.com> (дата обращения: 15.04.2017). – Текст: электронный.
80. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. ИЛ, М., 1961.
81. Электрические и электронные аппараты. Выключатели высокого напряжения: учебное пособие / Е. Н. Тонконогов; СанктПетербургский государственный политехнический университет. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012.
82. Электрические аппараты: Общая теория / Таев И.С. — Москва: Энергия, 1977. — 272 с. : ил .— Библиогр.: с.268-270

83. Электротехнический справочник. / Под общ. ред. Профессоров МЭИ Герасимова и др. – 10-е изд. – М.: Издательский дом МЭИ. 2009. 964 с.
84. Aslyamov I.M., Cathod process in electrotechnical complexes of electric discharge devices, Theses theme, pp. 1-139, 2014 (in Russian).
85. Barkan P., Lafferty J.M., Lee T.H. et al, Development of contact materials for vacuum interrupts, IEEE, Trans Power Appl. and Syst., 90, pp. 1-9, 1971.
86. Benilov M.S., Marotta A. //J. Phys.D: Appl. Phys. 1995. V.28. pp. 1869.
87. Benilov M.S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. V.22. pp.73.
88. Dickson D.J. A. von Engel. Proc. Roy. Soc, A300, № 1462,316,1967.
89. Damodaran A. Valuing Young/ Start-Up and Growth Companies: Estimation Issues and Valuation Challenges, P. 15. 2009.
90. Dole M, Mack LL, Hines RL, Mobley RC, Ferguson LD, Alice MB. Molecular beams of macroions . Journal of Chemical Physics. 1968 , 49:5, 2240.
91. Eroshkin M.V., Kiselyev G.V., Moos E.N., Rudenko A.I. In Book of Abst. of Reg. Workshop EMAS-2012, Italy, Padova. P. 345.
92. Germer L. J. Appl. Phys., 27,32,1956.
93. Jamamura S., J. Appl. Phys., 21,193,1950.
94. Kesselring F. Electrotechn. Z., A88,593,1967.
95. Kudyukin A.I., Moos E.N., Rott A.T., Rybin N.B., Stepanov V.A. Arc interaction with electrodes // Proceed. 11th Intern. Vac. Electr. Sourc. Conf. Seoul National University (SNU). Pp. 41–42. 2016.
96. Kudyukin A.I., Moos E.N., Rott A.T., Rybin N.B., Stepanov V.A. Technology and Physics Features of Vacuum Interrupters Production // Proceed. 11th Intern. Vac. Electr. Sourc. Conf. Seoul National University (SNU). Pp. 113–114. 2016.
97. Paul M.O. Nature, 215, № 5109,1474,1967.
98. Quadrupole mass spectrometry and its applications. // Ed. by P.H. Dawson. Elsiever. 349 P. 1976.
99. Reece M.P. Proc. IEE, 110,793,1963.

100. Seltzer I.A, Kukushkin S.A., Moos E.N., “Ion and electron characteristics at potential barrier modulation”, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 72, № 7. pp. 873-877, 2008.
101. Ziegler J.P., Biersack J.P., Littmark U. Stopping and ranges of ions in Solids. New York. 1985. 347 c.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



**ВАКУУМНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

Общество с
ограниченной
ответственностью

390023, Рязанская область, г. Рязань, пр-д Яблочкова, д. 56 литера В, тел./факс (4912) 458751
ИНН 6230033428, КПП 623001001, р/сч 40702810100700001669
в Филиале Центральный ПАО Банка «ФК Открытие» г. Москва,
БИК 044525297, кор/сч 30101810945250000297
Е — mail: info@vt62.ru

УТВЕРЖДАЮ
Директор
ООО «Вакуумные технологии»
К. И. Бобровский
« 06 » 06 2023г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов
кандидатской диссертационной работы
Александра Игоревича Кудюкина

«Бесштенгельное изготовление мощных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 «Вакуумная и плазменная электроника».

Впервые обследована структура электродов высоковольтных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер (КДВ) на различных стадиях производства. Показано изменение состава поверхности электродов и остаточной атмосферы в изделиях, на основании которых подобран оптимальный состав материалов в контактной системе.

Полностью описана технология изготовления и представлены:

- структура токопроводящего блока металлокерамической высоковольтной вакуумной дугогасительной камеры на 35 кВ и 110 кВ;
- материалы узлов и режимы их отжига в пайки в водородных печах;
- режимы финишной групповой бесштенгельной откачки приборов в вакуумной печи.

Диссертационной работой внесен значительный вклад в реализацию проекта Министерства промышленности РФ с финансированием по перевооружению предприятия ООО «Вакуумные технологии» самым современным технологическим оборудованием, оснащенным компьютерными системами управления и контроля всего технологического процесса. Впервые в России созданы условия для разработки и производства высококачественных высоковольтных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер во всем диапазоне напряжения и токов, не уступающие по стоимости и качеству лучшим зарубежным аналогам,

существенно (более, чем в 2 раза) увеличен объем производства всех классов металлокерамических вакуумных дугогасительных камер и решается задача импортозамещения.

На предприятии используется разработанная А. И. Кудюкиным модель управления инновационным производством.

Результаты диссертационной работы поспособствовали предприятию ООО «Вакуумные технологии» принять на вооружение передовой опыт и стать ведущей фирмой, использующей групповые современные методы и высокопроизводительное оборудование при производстве высоковольтных металлокерамических вакуумных и газоразрядных (включая дугогасительные камеры) приборов, выйти на первые места в России по качеству и объему изготавливаемой продукции.

Подтверждено, что использование бесштенгельной технологии изготовления металлокерамических вакуумных дугогасительных камер рабочим напряжением 110 кВ на базе высокопроизводительного оборудования возможно и обеспечивает большую (по количеству приборов) загрузку вакуумной печи, что значительно, в 1,5 — 2 раза, сокращает суммарное время откачки и пайки приборов.

Главный инженер

Осокин Евгений Александрович

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

«УТВЕРЖДАЮ»

Исполняющий обязанности

ректора РГУ имени

С.А. Есенина

д.т.н., профессор

И.А. Мурог

« 04 » 05. 2023 г.



АКТ

об использовании материалов диссертационной работы инженера кафедры общей и теоретической физики и методики преподавания физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина»
Кудюкина Александра Игоревича в учебном процессе

Настоящим подтверждаем, что при проведении учебного процесса по основным профессиональным образовательным программам высшего образования бакалавриата 16.03.01 «Техническая физика», направленность (профиль) «Физическая электроника», и магистратуры 16.04.01 «Техническая физика», направленность (профиль) «Инновационные технологии в науке и на производстве», в Рязанском государственном университете имени С.А. Есенина использованы материалы диссертации Кудюкина А.И. «Бесштенгельное изготовление мощных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1. – Вакуумная и плазменная электроника.

Полученные в диссертационной работе результаты были использованы при подготовке лекционного материала и лабораторного практикума по дисциплинам «Физика плазмы», «Материаловедение», «Эмиссионная электроника».

Директор института
физико-математических и
компьютерных наук,
к.ф.-м.н., доцент

Ольга Александровна Чихачева

Заведующий кафедрой
общей и теоретической физики
и методики преподавания физики,
к.ф.-м.н., доцент

Ольга Евгеньевна Трунина