

ОТЗЫВ

официального оппонента Молькова Сергея Ивановича
на диссертационную работу Кудюкина Александра Игоревича
«Бесштенгельное изготовление мощных металлокерамических
вакуумных дугогасительных камер»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.1. «Вакуумная и плазменная электроника»

Актуальность темы

Одной из важнейших научных областей для вакуумной электроники, является разработка и конструирование новых приборов с увеличенным рабочим ресурсом, в частности, вакуумных дугогасительных камер, а также промышленная реализация бесштенгельной групповой откачки и сборки крупногабаритных высоковольтных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер.

Практическое применение крупногабаритные высоковольтные вакуумные дугогасительные камеры нашли:

- в энергетике;
- на транспорте;
- в горно-рудном деле;
- в нефте- и газодобыче и т.д.

Современное высокопроизводительное вакуумное оборудование требует разработки новых режимов пайки (сборки) элементов, узлов и всего прибора крупногабаритных дугогасительных камер и внедрения в производство высоковольтной сильноточной групповой бесштенгельной их откачки.

Контактные материалы (КМ) на электродах дугогасительных камер, 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 диссертационной работы «Бесштенгельное изготовление мощных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер» является несомненно **актуальной и имеет важное научное и практическое значение.**

Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна представленных в работе результатов заключается в следующем:

1. При использовании бесштенгельной технологии изготовления металлокерамических вакуумных дугогасительных камер с рабочим напряжением 110 кВ на базе крупногабаритного вакуумного 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. Система управления водородной печи с описанными доработками обеспечивает необходимое равенство температур во всех зонах водородной печи при плавлении припоя, снижая градиент температуры в камере до 3-4 °С, и обеспечивает устойчивую работу технологического процесса производства изделий.

3. В дугогасительной вакуумной камере при возникновении электрической дуги происходит плавление материала медно-хромового катода, сегрегация атомов меди при окислении атомов и перераспределение элементного состава поверхности катода в исследуемых образцах.

4. С помощью метода атомно-силовой микроскопии и электронного микронзондового 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.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и заключений

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений, так как она обеспечена тем, что в диссертационной работе при исследованиях было использовано современное оборудование высокого класса и методики, позволяющие получить надежные экспериментальные данные. Достоверность результатов и обоснованность выводов подтверждается признанием научной значимости при обсуждении докладов на международных и всероссийских конференциях, публикацией статей в рецензируемых журналах.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением аналитических и численных методов. Полученные в диссертации расчетные данные сравнивались с имеющимися расчетными и экспериментальными данными других авторов.

Оценка содержания диссертационного исследования.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения с выводами по работе, списка литературы, приложения. Диссертация изложена логично. В ней достаточно полно приведены результаты научной работы автора.

Во **введении** дана краткая характеристика работы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, выносимые на защиту научные положения, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

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

Во **второй главе** изложены основные этапы совершенствования технологии изготовления высоковольтных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер типа КДВ-110, на основе проведенного в ходе выполнения диссертации исследования.

До проведения настоящей работы камеры на 110 кВ откачивались в основном через специальное приспособление (штенгель), что исключало возможность групповой обработки изделий с целью повышения производительности труда. При переходе на бесштенгельную откачку произведены изменения конструкции камер. Основными из них являются исключение штенгеля и формирование участка вакуумной оболочки для пайки финишного герметизирующего шва. Полностью описан цикл нового производства и рассчитано время снижения давления остаточного газа (воздуха) внутри КДВ-110 в результате истечения через щель между собранными узлами от начального значения $P_0 = 3$ мм рт. ст. до конечного $P = 75 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

Отмечено, что важным моментом совершенствования производства является процесс пайки металлокерамических узлов и разработка после серии испытаний нового состава припоя ПСр-72, в него добавлена малая процентная доля никеля, что позволило производить пайку сильфона из нержавеющей стали с медным экраном исключив из цикла производства процессы никелирования и меднения контактной поверхности сильфонов.

Третья глава посвящена исследованию деградационных процессов, протекающих на поверхности контактов дугогасительных камер под воздействием дуги, и поиску оптимальных методов и средств производства,

позволяющих повысить эффективность приборов. Камеры предназначены для коммутации высокого переменного напряжения при токе около 2 кА (до 30 кА при разрыве тока в аварийном режиме). Анализируется обоснованность применения многокомпозиционных электродных материалов, в частности, – сплавных систем (Cu 60 % - Cr 40 %).

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

Предложена конструкция нового вида электродов с дополнительными подслоями меди.

В заключении формулируются основные результаты работы.

Соответствие автореферата основным положениям и выводам диссертации

Автореферат правильно отражает содержание диссертации и представляет краткое изложение всех основных результатов диссертационной работы. Расхождений между выводами в автореферате и диссертации нет. Стоит отметить, что основная часть полученных в диссертации результатов закономерно вошла в научные положения, выносимые на защиту.

Замечания

1. Представленная в работе структура исследования недостаточно наглядна и понятна.
2. В работе проводится исследование серийных медно-хромовых контактов, однако они существуют и в виде других сплавных систем. Данные о проведении исследования таких приборов в тексте диссертации отсутствуют.
3. Нет четкого определения обобщенного критерия «качественного» прибора.

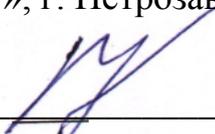
Отмеченные замечания **не снижают** научной и практической значимости диссертационной работы, не затрагивают научных положений и не влияют на достоверность и значимость полученных результатов.

Таким образом, принимая во внимание все вышесказанное считаю, что диссертация Кудюкина Александра Игоревича «Бесштенгельное изготовление мощных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер» является законченной квалификационной работой, по актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, достоверности полученных результатов и обоснованности выводов соответствует требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», в части кандидатских диссертаций, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1. «Вакуумная и плазменная электроника».

Официальный оппонент:

Мольков Сергей Иванович

доктор физико-математических наук, профессор кафедры электроники и электроэнергетики федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск

 / Сергей Иванович Мольков /

Адрес: 185035, Респ. Карелия, Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Телефон: 8 (814) 271-10-30

e-mail: tandem@onego.ru

«22» 02 2024 г.

Подпись Молькова С.И. заверяю

Подпись руки <u>Молькова</u> <u>Сергей Иванович</u>
УДОСТОВЕРЯЮ.
Уч. секретарь ученого совета <u>Девин</u> <u>Александрович А.А.</u>
<u>26 февраля 2024</u> г.



Секретарь ученого совета  26.02.2024