

## ОТЗЫВ

официального оппонента Привалова Вадима Евгеньевича  
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.** Результаты диссертационной работы направлены на создание и применение надежных металлокерамических высоковольтных дугогасительных камер на 110 кВ, расширяющих области применения их в энергетике, транспорте, нефтяной и других областях техники и развитие современных промышленных технологий, обеспечивающих импортозамещение всего класса металлокерамических дугогасительных камер с использованием высокопроизводительного оборудования больших объемов для пайки и откачки.

В работе исследуются особенности технологий пайки и откачки приборов, контроля вакуума и герметичности готовых изделий. Методами атомно-силовой микроскопии и электронного микрозондового анализа совместно с растровым наблюдением микрорельефа поверхности, осуществляемым с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV, изучаются изменения морфологии поверхности и состава композиционного контактного материала Cu-Cr (его деградация) в условиях интенсивных энергетических потоков. Поэтому тема диссертационной работы «Бесштенгельное изготовление мощных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер» является несомненно **актуальной и имеет важное научное и практическое значение.**

### **Теоретическая значимость.**

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

Создана технология производства групповым (бесштенгельным) методом мощных высоковольтных (на 110 кВ) металлокерамических вакуумных дугогасительных камер в вакуумных системах с объемом камеры откачки до 9 м<sup>3</sup>.

### **Практическая значимость.**

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).

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.

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%.

**Новизна научных положений.** Научная новизна заключается в:

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 образцов.

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.

**Степень обоснованности и достоверности.** Нет сомнений в том, что достоверность полученных результатов обеспечивается тем фактом, что в исследовательской работе использовались современное высокотехнологичное оборудование и технологии для получения достоверных экспериментальных данных.

Достоверность результатов и обоснованность выводов определяются признанием научной значимости при обсуждении докладов на международных и всероссийских конференциях, публикацией статей в рецензируемых журналах.

Обоснованность и надежность научных утверждений, выводов и рекомендаций подтверждаются правильным применением аналитических и численных методов. Расчетные данные, полученные в работе, были сопоставлены с имеющимися расчетными и экспериментальными данными других авторов.

**Оценка содержания диссертационного исследования.** Работа состоит из введения, 3 глав, заключения с выводами о работе, списка использованной литературы и приложений. Тезисы изложены логично. В них полностью представлены результаты научных исследований автора.

В основной части диссертации представлены результаты анализа исследований вакуумных дугогасительных камер и приведены литературные данные по данной теме. Изложены основные результаты в технических областях дугогасительных камер, контактных материалов и производства керамических изоляторов. Описаны основные этапы совершенствования технологии изготовления высоковольтных металлокерамических вакуумных дугогасительных камер типа КДВ-110 на основе исследований, выполненных в рамках данной диссертационной работы.

Показаны ключевые моменты совершенствования производственного процесса пайки металлокерамических узлов, где разработанный после серии испытаний новый состав припоя ПСр-72 с низкой долей никеля позволяет паять сильфоны из нержавеющей стали с медными экранами без операции никелирования контактной поверхности. Большая часть работы посвящена исследованию деградационных процессов, происходящих на контактных поверхностях дугогасительной камеры под воздействием дуги, и поиску оптимальных методов и средств изготовления для повышения эффективности работы оборудования.

Сканирование контактной поверхности электронным зондом (анализ элементного состава по глубине) позволило обнаружить зоны, в которых содержание меди уменьшается на 14% с увеличением глубины. Это свидетельствует о процессе сегрегации атомов к поверхности.

В заключении описаны основные результаты данного исследования.

**Соответствие автореферата диссертации.** Автореферат правильно отражает содержание диссертации и представляет собой краткое изложение основных результатов диссертационного исследования. Несоответствия между авторефератом и выводами диссертации отсутствуют. Следует отметить, что основные результаты, полученные в диссертации, естественным образом включаются в научные положения, выносимые на защиту.

**В качестве замечаний** необходимо отметить:

1. Спорный выбор объектов исследования. Исследования проводились только на 2 типах приборов (на 35 кВ и 110 кВ).
2. Недостаточная проработка существующих методов определения анализа вакуума.

Указанные замечания **не снижают** общей ценности диссертационной работы и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации.

Содержание автореферата в полной мере соответствует материалу диссертации.

В диссертации Кудюкина А.И. решена важная и актуальная научно-техническая задача разработки технологии группового (бесштengelного) производства высоковольтных (на 110 кВ) металлокерамических вакуумных дугогасительных камер в вакуумных системах с объемом

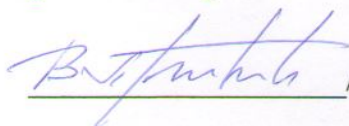
до 9 м<sup>3</sup> по качеству и стоимости не уступающие лучшим зарубежным аналогам.

В итоге 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 «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:**

Привалов Вадим Евгеньевич

доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики  
федерального государственного автономного образовательного  
учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

 / Вадим Евгеньевич Привалов /

Адрес: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

Телефон: 8 (812) 775-05-30

e-mail: vaevpriv@yandex.ru

«16» января 2024 г.

Подпись Привалова В. Е. заверяю



С отрывком ознакомлен 15.02.2024г

 /А. Н. Кудюкин/