

На правах рукописи

Чжо Янян

РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК
НА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ УСТАНОВКЕ «ЛУЧ»

Специальность 2.2.3. Технология и оборудование для производства
материалов и приборов электронной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Чжо Янян

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Научный руководитель:

Моисеев Константин Михайлович
кандидат технических наук

Официальные оппоненты:

Климов Александр Сергеевич
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры физики ФГБОУ ВО «ТУСУР»

Федоров Сергей Вольдемарович
кандидат технических наук,
доцент кафедры высокоэффективных технологий
обработки ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Защита диссертации состоится «__» _____ 2023 г. в _____ час. на заседании диссертационного совета 24.2.331.16 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.16
доктор технических наук, доцент



С. А. Мешков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы

Постоянно растущая номенклатура изделий электронной техники с использованием керамических печатных плат (ПП) и большой разброс требований к ним приводит к необходимости использования различных керамических материалов – спеченной керамики, высокотемпературной (НТСС) и низкотемпературной (ЛТСС) совместно обжигаемой керамики. Данные материалы подвергаются размерной обработке, имея при этом широкий разброс физических характеристик. Причём для НТСС и ЛТСС обработка может вестись как в твердом (спеченном) состоянии, так и в мягком (сыром). Обработка в сыром состоянии особенно актуальна для создания многослойных ПП для СВЧ изделий, которые обеспечивают увеличение степени интеграции компонентов и позволяют уменьшить габариты и массу изделий.

Размерную обработку керамики традиционно ведут механическими (сверление для спеченной керамики и пробивка для сырой НТСС и ЛТСС) и лазерными методами. Для механических методов характерен существенный износ инструмента, особенно для малых отверстий, необходимость изготовления новых штампов и матриц для каждого нового типа изделия, а для лазерного – зависимость качества обработки от оптических свойств материала и влияние на его состав.

Альтернативным методом является электронно-лучевая обработка (ЭЛО), в большой степени избавленная от ограничений механической и лазерной обработки.

Состояние проблемы

При ЭЛО диэлектриков существуют трудности из-за низкой тепло- и электропроводности материалов, что приводит к растрескиванию материала и накоплению поверхностного заряда на обрабатываемой поверхности.

Ряд российских ученых (Окс Е. М., Климов А. С., Медовник А. В., Гынгазов С. А. и др.) и научных коллективов из организаций (ТУСУР, ТПУ, ИСЭ СО РАН) и других стран (IBM, Hamilton Standard Division, США; Hitachi, Япония) исследовали процесс и возможности ЭЛО спеченной и НСС керамики, изучали механизм накопления поверхностного заряда. Однако в найденных в открытой печати научных работах не раскрыта комплексная взаимосвязь параметров ЭЛО с выходными характеристиками получаемых отверстий, отсутствуют практические рекомендации по размерной ЭЛО керамических материалов.

Кроме того, в настоящее время нет серийно выпускаемых электронно-лучевых пушек (ЭЛП) для размерной обработки керамических материалов.

Используемые в работах ученых ЭЛП, как правило, являются исследовательскими. Как следствие, отсутствуют требования к ЭЛП и электронно-лучевым установкам (ЭЛУ) для размерной обработки керамических материалов. Вместе с тем на производственных предприятиях и в научно-исследовательских организациях, связанных с разработкой и выпуском изделий электронной техники с керамическими ПП, имеется большое ЭЛУ с мощными ЭЛП для электронно-лучевой сварки, плавки, наплавки. Исследование процесса и выработка рекомендаций по обработке керамических материалов на ЭЛУ такого класса позволит существенно расширить их технологические возможности и сократить время разработки новых образцов изделий.

Поэтому **целью работы** является научно-обоснованный выбор режимов получения отверстий в керамических подложках с использованием мощных электронно-лучевых пушек.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнение ряда **задач**:

- 1) проведение обзора литературы для анализа и определения требований к размерной обработке керамических подложек электронным лучом;
- 2) теоретическое обоснование выбора режимов процесса ЭЛО, в том числе с использованием компьютерного моделирования, и выявление их влияния на параметры ЭЛО керамических подложек;
- 3) анализ и экспериментальная оценка технологических возможностей электронно-лучевой установки «ЛУЧ» с мощной ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП и определение базовых требований к подобному классу оборудования для обработки керамических подложек;
- 4) исследование влияния технологических режимов получения отверстий в керамических подложках в электронно-лучевой установке «ЛУЧ» на параметры получаемых отверстий (диаметр, разброс значений диаметра, зона термического влияния) и выработка рекомендаций для электронно-лучевой обработки керамических подложек.

В ходе выполнения работы определены положения **научной новизны**:

- 1) для электронно-лучевого получения отверстий в спеченной и сырой керамике теоретически установлено, что их обработку целесообразно вести в импульсном режиме, а также определена взаимосвязь технологических режимов ЭЛО (ток обработки, время импульса и температура предварительного нагрева подложки) с геометрическими параметрами получаемых отверстий (диаметр и

глубина), с внутренними напряжениями и деформациями подложек, возникающими при обработке;

2) экспериментально установлено влияние технологических режимов обработки с использованием мощной ЭЛП (ток обработки, время импульса, состояние фокуса) на характеристики получаемых отверстий (диаметр, разброс значений диаметра, зона термического влияния) в керамических подложках из спеченной керамики типа ВК-94;

3) экспериментально определено, что для получения отверстий в сырой ЛТСС типа КЕКО СК-47 посредством ЭЛО с использованием мощной ЭЛП процесс необходимо вести в режиме сканирования с использованием развертки ЭЛ, используя защитную пластину (маску), а также экспериментально получены зависимости параметров развертки (частота развертки, длина развертки, скорость движения координатного стола) на качество получаемых отверстий (зона термического влияния).

Практическая ценность исследований:

1) продемонстрировано, что на электронно-лучевых установках типа «ЛУЧ» с мощными электронно-лучевыми пушками типа ЭЛТА-60.15ДП возможна обработка как спеченной керамики, так и сырой ЛТСС, и отработаны основные технологические режимы получения отверстий;

2) составлены рекомендации для проведения размерной ЭЛО керамических подложек с использованием мощных ЭЛП типа ЭЛТА-60.15ДП в существующих установках электронно-лучевой обработки;

3) Определены требования к ЭЛП и ЭЛУ для размерной обработки керамических материалов.

Результаты внедрения

Материалы диссертационной работы и полученные результаты использованы:

1) в ООО «ТЕКАРТЕ» при разработке нового оборудования для электронно-лучевой обработки.

2) в учебном процессе кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Также результаты выполненной работы по теоретическому и экспериментальному исследованию влияния технологических режимов электронно-лучевой обработки керамических подложек мощными ЭЛП целесообразно использовать при проектировании электронно-лучевого

оборудования в ОАО «НИТИ «Прогресс», ООО «НПК Тэта», ООО «Ферри Ватт», АО «НИИТМ», а также для расширения технологических возможностей имеющихся установок электронно-лучевой обработки в АО «Плутон», ФГУП «ВНИИА», АО «НПП «Исток» им. Шокина» и других предприятиях-производителях многослойных печатных плат с керамическими основаниями и изделий электронной техники, использующих керамические материалы.

Методы исследования

Для оценки способов размерной обработки керамики использован критериальный анализ. Определение требований к параметрам ЭЛО и оценка технологических возможностей ЭЛП проведены методами численного моделирования физических процессов. При проведении экспериментальных исследований и обработки экспериментальных данных использованы теория планирования эксперимента и методы статистической обработки.

Достоверность полученных результатов

Достоверность научных положений, результатов и выводов подтверждается их повторяемостью, применением стандартных методик проведения исследований и статистической обработки и проверки полученных моделей на адекватность, использованием поверенных средств измерения.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) отверстия в подложках из керамических материалов посредством ЭЛО необходимо получать в импульсном режиме, при этом длительность импульса должна составлять менее 30 мкс для спеченной высокотемпературной керамики, и менее 3 мкс для ЛТСС, а длительность паузы должна составлять ~100 мс;
- 2) при импульсном получении отверстий в подложках из высокотемпературной спеченной керамики на электронно-лучевой установке «ЛУЧ» с использованием мощной ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП необходимо устанавливать минимальные значения тока обработки 1 мА и длительности импульса 5 мА, максимальное значение длительности паузы 100 мс, и обработку вести с предварительным нагревом подложек до максимально возможной температуры 600°C;
- 3) при получении отверстий в подложках из сырой ЛТСС на электронно-лучевой установке «ЛУЧ» с мощной ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП необходимо использовать режим сканирования при минимальном токе обработки 1 мА и максимальной частоте развертки ЭЛ 1200 Гц с использованием защитной пластины (маски).

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертационной работы представлены и обсуждены на следующих конференциях и форумах: 17 Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, 2023; 15 Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», Москва, 2022; 16 Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии», Москва, 2022; 16 Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, 2022; 26 Научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника», Судак, 2019; 11 Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов с международным участием «Будущее машиностроения России», Москва, 2018; II Всероссийский форум научной молодежи «Богатство России», Москва, 2018.

Публикации

Результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 9 научных работах в рецензируемых журналах и трудах конференций, в том числе 1 в научно-технических журналах, рецензируемых Scopus, и 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 из которых – по направлению специальности, общим объемом 1,46 п. л.

Личный вклад

Автор лично принимал участие в запуске и модернизации установки электронно-лучевой обработки «ЛУЧ», планировал и проводил эксперименты, осуществлял их обработку и анализ результатов. Автором смоделирован процесс электронно-лучевого сверления и резки керамических подложек с помощью программных комплексов CST, ANSYS, MATLAB и разработаны рекомендации для ЭЛО подложек из керамических материалов.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, заключения, приложения и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 161 странице машинописного текста, содержащей 84 рисунка, 14 таблиц и список литературы из 113 наименований.

Содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность тематики работы, формулируются ее цель и задачи, определяются научная новизна и практическая значимость работы.

В Главе 1 описаны современное состояние и области применения ЭЛО, в том числе для размерной обработки керамических материалов. Проведен анализ методов размерной обработки керамики, а также анализ особенностей и проблем размерной ЭЛО керамики. Рассмотрены тенденции использования керамических материалов в изделиях электронной техники. Акцент сделан на LTCC и технологические особенности получения отверстий для межсоединений для перспективных СВЧ изделий.

Технология производства электронных компонентов, в том числе СВЧ, на базе LTCC является перспективной за счет реализации многослойной структуры, требующей, однако, создание большого количества отверстий для межслойных соединений в сырой керамике является ограничивающим фактором. В результате анализа литературных источников обнаружено, что по сравнению с механическими и лазерными методами обработки для обеспечения более жестких требований к размерной обработке керамики, перспективно использовать метод электронно-лучевой обработки, обеспечивающий высокое аспектное соотношение (15:1), до 10 раз более высокую скорость обработки, нечувствительность к материалу подложки и КПД до 90%, но требуются дополнительные исследования. Также в результате обзора установлено, что несмотря на то, что ЭЛ используется как источник тепла уже много лет и его применение в различных технологических процессах, особенно в сварке, плавке, нанесении пленок, литографии непрерывно развивается как в исследованиях, так и в промышленном применении, размерной обработке керамических материалов уделяется значительно меньше внимания.

Используемые в существующих исследованиях по размерной и микроразмерной обработке керамики ЭЛП являются исследовательскими или экспериментальными, и не предназначены для промышленной технологии, тогда как исследований с использованием промышленных серийно выпускаемых ЭЛП в литературе практически нет, что приводит к необходимости проведения таких исследований и выработке практических рекомендаций, что также обеспечит расширение технологических возможностей имеющихся на предприятиях и в организациях установок электронно-лучевой обработки с мощными ЭЛП.

В Главе 2 проведен анализ механизмов ЭЛО спеченной и сырой керамики и факторов, влияющих на тепловые воздействия при ЭЛО керамики, дана оценка технологических возможностей электронно-лучевой установки «ЛУЧ» с ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП для ЭЛО керамики, рассчитан тепловой баланс, составлена модель

электронной пушки в среде программной среде CST и проведено численное моделирование процесса ЭЛО керамики в программном комплексе ANSYS.

В связи с малым проникновением электронов нагрев для твердых тел является чисто поверхностным. Тепловое воздействие электронного луча с энергией E_0 на твердое тело характеризуется распределением температуры по его поверхности во времени:

$$T(r, t) = \frac{E_0}{\rho \cdot c (4\pi\sigma_T t)^{3/2}} \exp\left(\frac{-r^2}{4\sigma_T t}\right), \quad (1)$$

где r – расстояние от центра луча до рассматриваемой точки; $\sigma_T = \lambda_T / (\rho c)$ – температуропроводность материала; λ_T – теплопроводность; ρ – плотность материала; c – теплоемкость.

Для твердых однородных материалов (металлов и спеченной керамики) известны их теплофизические параметры – удельная теплоемкость и удельная теплопроводность. Поэтому можно пользоваться и моделями, и численными методами решения уравнений. А для таких материалов, как сырая керамика, где имеются фазы с различными свойствами, которые, в свою очередь, изменяются в процессе обработки, необходимо режимы подбирать экспериментально.

Диаметр ЭЛ и состояние фокуса существенно влияют на этот процесс, поскольку определяют плотность энергии ЭЛ при соответствующем токе обработки, которая, в свою очередь, определяет тип и параметры обработки. Для оценки технологических возможностей в программном комплексе MATLAB рассчитаны диаметр электронного пучка (Рисунок 1, а) и плотность энергии (Рисунок 1, б) ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП.

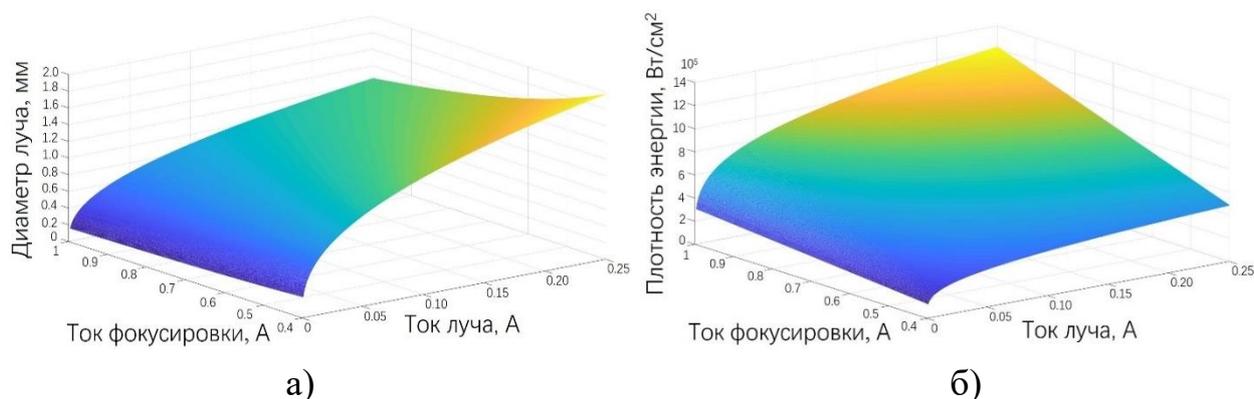


Рисунок 1. Зависимости диаметра и плотности энергии от тока пучка и от тока фокусировки ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП

Контролируя плотность энергии электронного пучка и длительность процесса передачи энергии, становится возможным достижение различных

способов обработки. Исходя из результатов расчетов проанализированы технологические возможности ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП (Рисунок 2): переплавка материалов, сварка и размерная обработка (сверление).

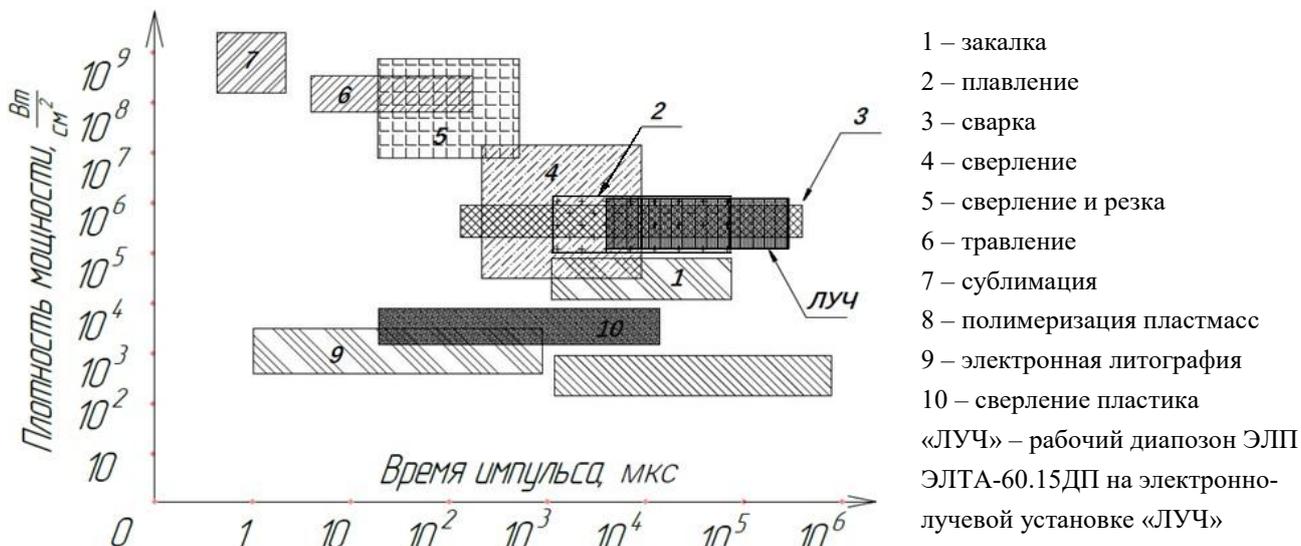
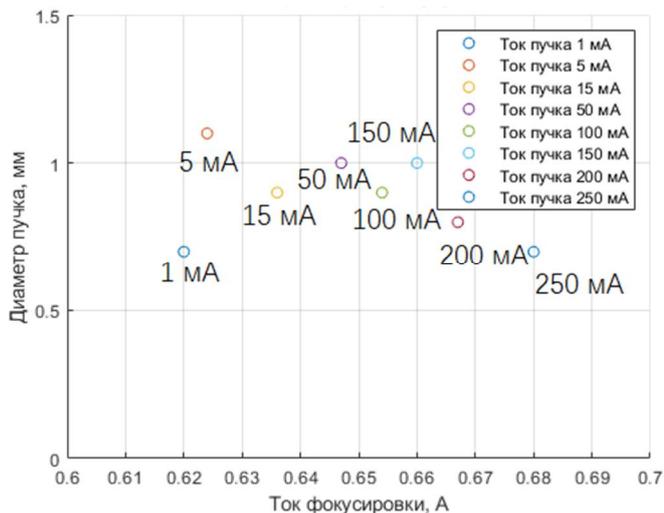


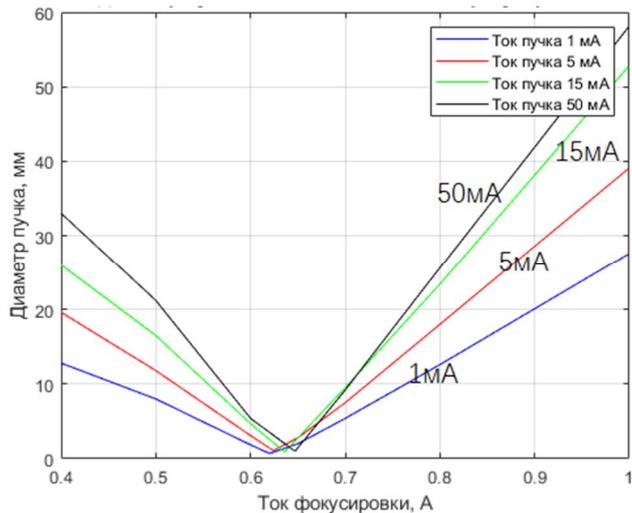
Рисунок 2. Технологические возможности ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП на диаграмме соответствия плотности энергии и времени импульса ЭЛО

Механизмы ЭЛО спеченной и сырой керамики существенно отличаются. Тепловой баланс процесса ЭЛО рассчитан отдельно для каждого случая и определены его параметры. Для ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП при сфокусированным ЭЛ диаметром 0,2 мм с минимальным током обработки 1 мА и минимальной длительностью импульса 5 мс для обработки сырой ЛТСС марки КЕКО СК-47 толщиной 254 мкм потребуется всего 1 импульс, а для спеченной керамики ВК-94 толщиной 2,2 мм потребуется уже 7 импульсов.

С использованием программного пакета CST составлена модель ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП и смоделирован процесс испускания и фокусировки электронов. Для обработки в плоскости координатного стола установки ЭЛО «ЛУЧ» рассчитан необходимый ток фокусировки для ряда значений из полного диапазона тока обработки, соответствующий ему диаметр луча (Рисунок 3, а). В некоторых случаях обработка может быть проведена с использованием несфокусированного луча. Для этого построена зависимость диаметра луча от тока фокусировки при часто используемых значениях тока обработки (Рисунок 3, б).



а)



б)

Рисунок 3. Ток фокусировки и диаметр при заданном токе пучка и зависимости диаметра пучка на в плоскости стола от тока фокусировки при различных значениях тока обработки

Проведено численное моделирование процесса ЭЛО керамики в программной среде ANSYS и оценено влияние основных параметров процесса (тока обработки, длительности импульса, предварительной температуры нагрева) на диаметр и глубину получаемых отверстий, а также на температуру в зоне обработки, возникающие внутренние напряжения и деформации. Моделирование показывает, что нагрев материала в зоне обработки до температуры испарения (~3000°C) происходит через 30 мкс, а до температуры испарения сырой LTCC (~300°C) через 3 мкс (Рисунок 4), при этом температура возвращается к исходной через 100 мс (Рисунок 5).

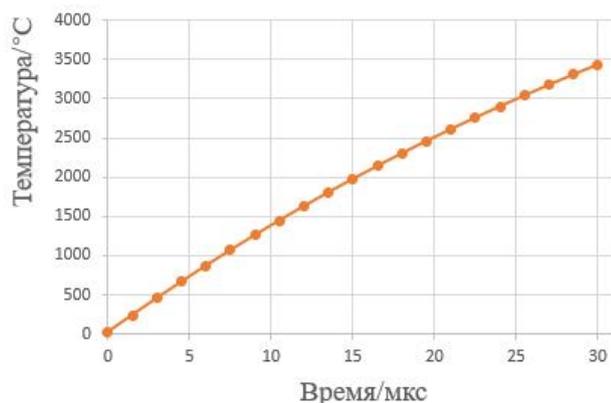


Рисунок 4. Зависимость температуры в точке воздействия Эл от времени

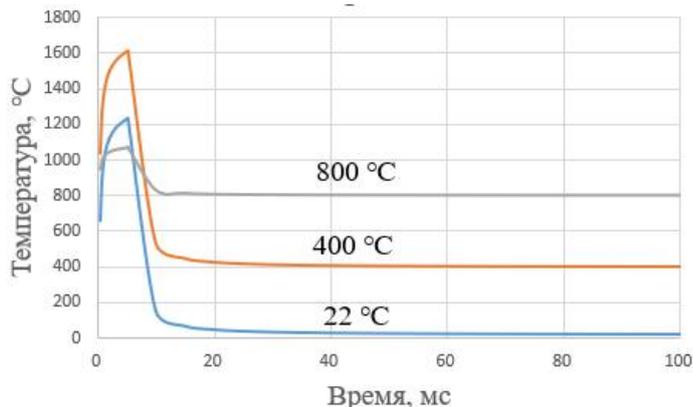


Рисунок 5. Температурный цикл при разных начальных температурах

Определены зависимости внутренних напряжений и термических деформаций от начальной температуры обработки и обнаружено, что температуре обработки 800°C внутренние напряжения снижаются в 3,5 раза, а деформации – в 5,5 раз по сравнению со значениями при начальной температуре обработки 22°C . Исследовано влияние тока обработки и длительности импульса на диаметр (Рисунок 6, а) и глубину отверстия (Рисунок 6, б).

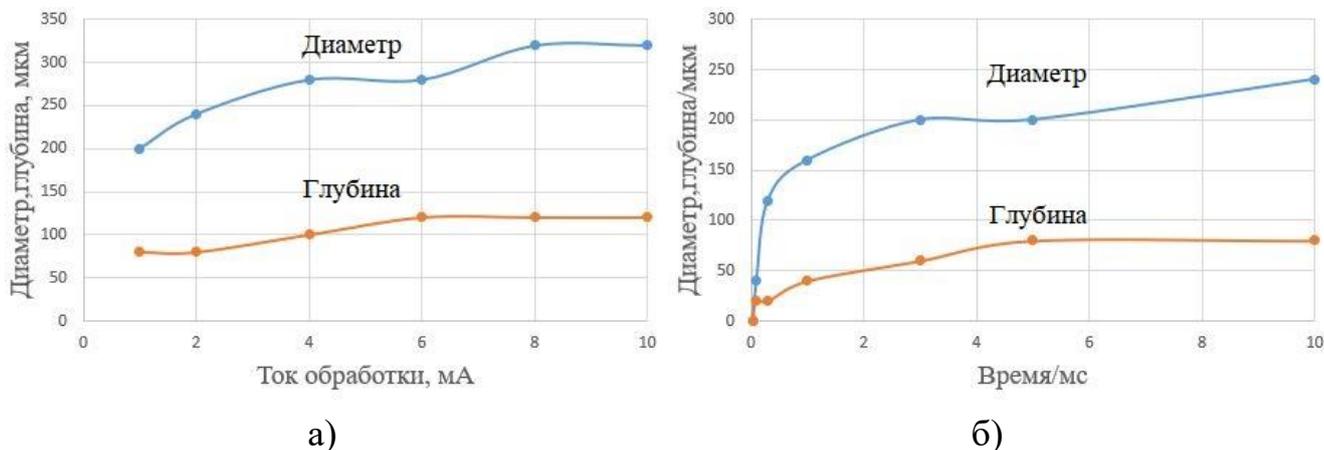


Рисунок 6. Зависимости диаметра отверстия и глубины обработки: а) от тока обработки при однократном импульсе, б) от длительности импульса

В Главе 3 описана установка ЭЛО «ЛУЧ» с ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП, ее управление; проанализированы ее технологические возможности; реализован метод измерения тока фокусировки и диаметра пучка и получены экспериментальные зависимости.

Проанализированы технические характеристики установки ЭЛО «ЛУЧ» с промышленной ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП и определено, что по большинству параметров установка соответствует требованиям для ЭЛО керамики и может быть использована для проведения исследований. При этом установлено, что фактический диаметр луча превышает паспортное значение почти в 4 раза.

Экспериментально определен диаметр зон обработки на металлической пластине, который может быть обеспечен ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП электронным пучком в сфокусированном и расфокусированном состоянии, и оценены фактические размеры диаметра электронного луча. Минимальный диаметр электронного пучка составляет 0,76 мм, что значительно отличается от паспортного значения (0,2 мм). Для более точного экспериментального определения состояния фокусировки и измерения диаметра электронного пучка проанализированы методы измерения и реализован метод вращающегося зонда (Рисунок 7). При этом вместо вращения зонда и размещения для этого в камере привода, использовано сканирование электронного луча.

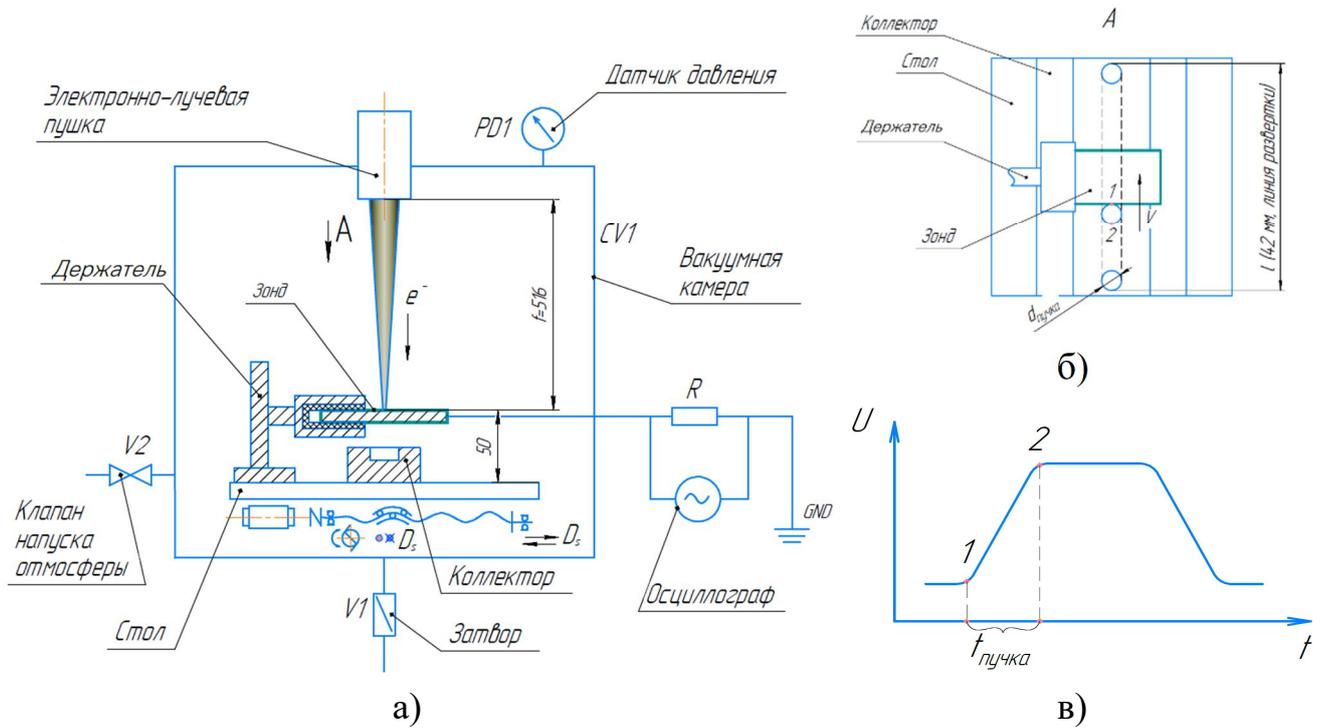


Рисунок 7. Реализация метода вращающегося зонда: а) схема метода, б) траектория движения (сканирования) ЭЛ, в) график изменения напряжения

Определен ток фокусировки и соответствующий ему диаметр луча при различных токах обработки, что позволяет определить исходные данные для последующих экспериментов. Когда ток обработки высок, наличие сферической аберрации влияет на качество ЭЛ, поэтому рекомендуется использовать небольшой ток до 6 мА. При токе фокусировки 625 мА и токе обработки 1 мА диаметр луча в плоскости координатного стола достигает минимума – 0,747 мм.

В Главе 4 проведены экспериментальные исследования по обработке спеченной керамики ВК-94 и сырой LTCC КЕКО СК-47 на установке ЭЛО «ЛУЧ», разработан базовый технологический процесс ЭЛО керамики на установке ЭЛО «ЛУЧ» и даны рекомендации по ЭЛО высокотемпературной спеченной керамики и сырой LTCC.

Для спеченной керамики ВК-94 проведены эксперименты, направленные на изучение влияния параметров ЭЛ на диаметр отверстия и зону термического влияния (Рисунок 8). Исследовано влияние количества импульсов (Рисунок 8, а), тока обработки (Рисунок 8, б), состояния фокуса (Рисунок 8, в), длительности импульса (Рисунок 8, г) и длительности паузы (Рисунок 8, д). Отверстия наиболее правильной формы с наименьшим диаметром 2,31 мм и наименьшей зоной термического влияния получаются при токе обработке 1 мА, длительностью импульса 5 мс, длительностью паузы 100 мс, при этом количество импульсов

определяется толщиной подложки. Изменение диаметров отверстий относительно диаметра пучка связаны с явлением накопления заряда на поверхности керамики.

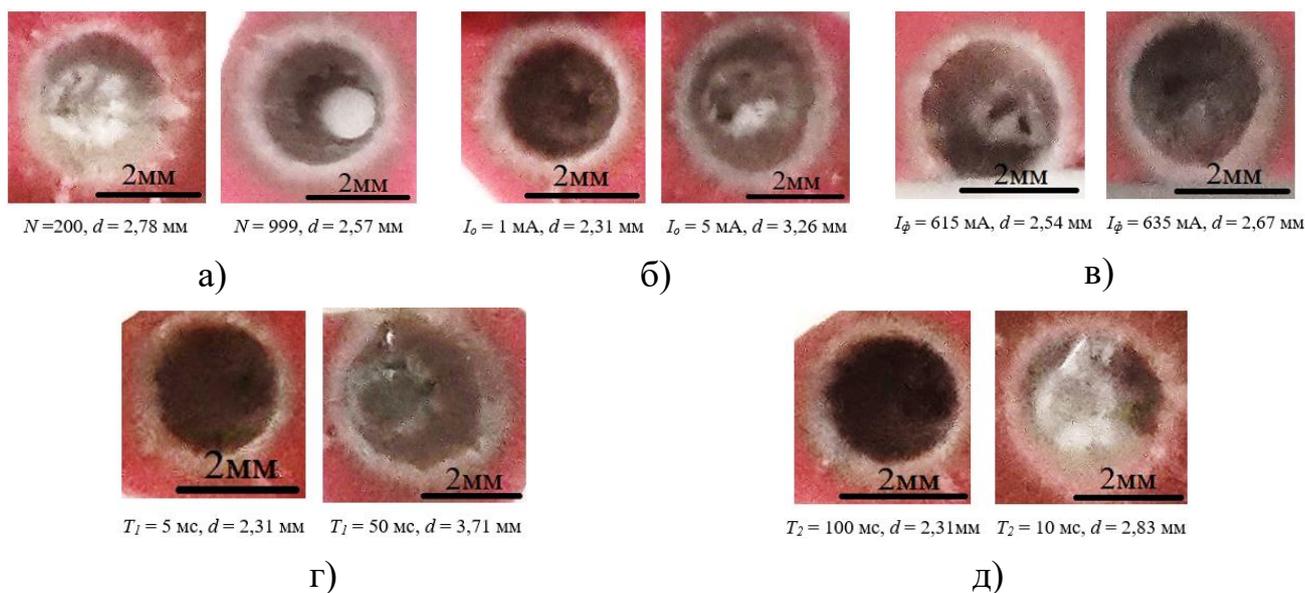


Рисунок 8. Отверстия, полученные в пластине ВК-94 толщиной 2,2 мм при:
 а) разным количеством импульсов; б) разным токе пучка; в) разным состоянием фокуса; г) разной длительности импульса; д) разной длительности паузы

Результаты обработаны статистическими методами и представлены в виде зависимостей (рис. 9).

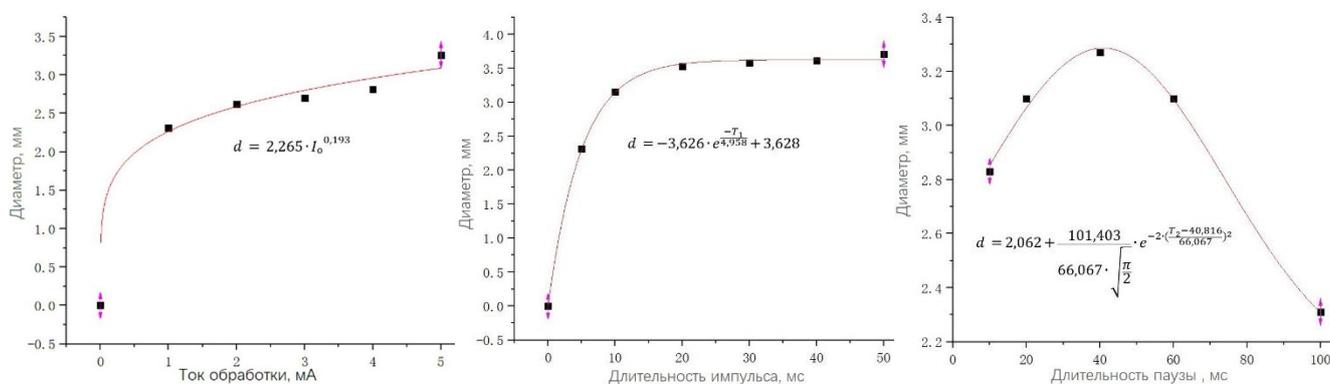


Рисунок 9. Зависимости диаметра отверстия в пластине ВК-94 толщиной 2,2 мм от: а) тока пучка; б) длительности импульса; в) длительности паузы

Для исследования воспроизводимости и определения разброса диаметра получаемых отверстий проведено 10 экспериментов при режиме: ток обработки 1 мА, ток фокусировки 625 мА, время импульса 5 мс, время паузы 100 мс, количество импульсов 500, рабочее давление в камере 10^{-4} Торр. Интерквартильный размах составляет 5% от среднего значения диаметра 2,36 мм.

Для обработки листов сырой LTCC типа КЕКО SK-47 реализованы три способа: прямая обработка, обработка с покрытием алюминиевой фольги и с покрытием пластины из нержавеющей стали с отверстиями в режиме сканирования

ЭЛ. Первые два метода обработки дают плохие результаты (некруглая форма и довольно большой диаметр в диапазоне от 2,48 до 3,5 мм), а также большие зоны температурного воздействия вокруг отверстий из-за избыточной плотности энергии ЭЛ. При третьем способе обработки возможно уменьшение плотности энергии ЭЛ за счет режима сканирования, который реализуется разверткой ЭЛ с различными параметрами (Рисунок 10, а).

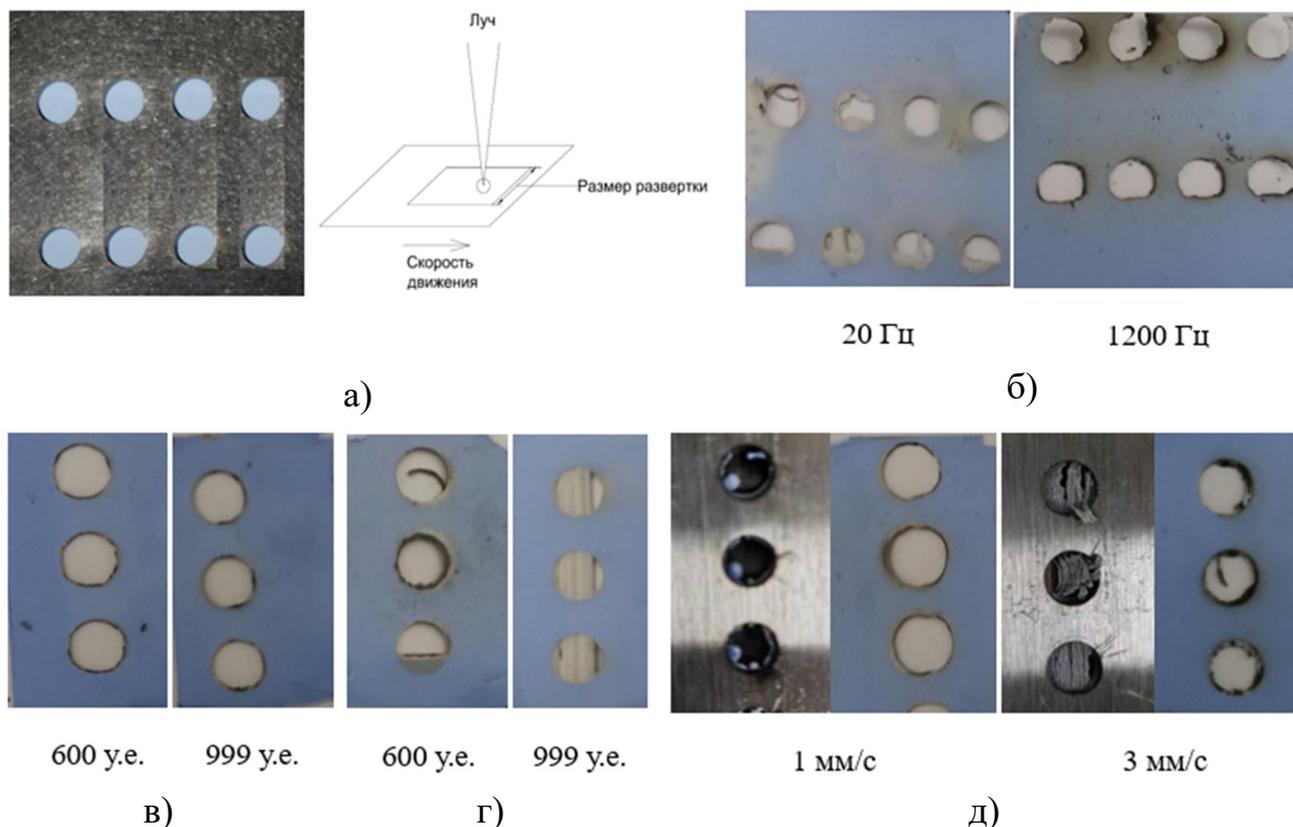


Рисунок 10. Отверстия, полученные в LTCC KEKO SK-47 толщиной 254 мкм:
 а) схема обработки; б) при разной частоте развертки; в) при разной длине развертки с частотой 1200 Гц; г) при разной длине развертки с частотой 50 Гц;
 д) при разной скорости движения координатного столика

Различные сочетания этих параметры определяют, с какой скоростью и в каком количестве будет подводиться энергия от электронного пучка к керамической подложке.

Исследовано влияние параметров сканирования: частоты развертки (Рисунок 10, б), длина развертки при высокой частоте 1200 Гц (Рисунок 10, в) и низкой частоте 50 Гц (Рисунок 10, г) и скорости движения координатного стола (Рисунок 10, д) на качество обработки.

В результате анализа предложены рекомендации по повышению качества ЭЛО спеченной керамики типа ВК-94 и сырой LTCC типа KEKO SK-47.

В заключении анализируются полученные результаты и приводятся общие выводы по работе.

Основные результаты и выводы

1. В результате численного моделирования процесса ЭЛО установлено, что для обработки керамических материалов необходимо использовать время импульса менее 30 мкс для спеченной высокотемпературной керамики и менее 3 мкс для ЛТСС, время паузы ~100 мс.

2. В результате расчетов и численного моделирования мощной ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП установлено:

- плотность энергии электронного луча для разных соотношений тока обработки в диапазоне от 1 до 250 мА и тока фокусировки от 400 до 999 мА находится в диапазоне от $1,22 \cdot 10^5$ до $1,22 \cdot 10^6$ Вт/см². При этом для минимального тока сфокусированного пучка 1 мА плотность энергии составляет $1,9 \cdot 10^5$ Вт/см², что, согласно литературным данным, является достаточным для проведения размерной обработки;
- диаметр луча, сфокусированного в плоскости координатного стола установки ЭЛО «ЛУЧ», составляет 0,7 мм при минимальном токе обработки 1 мА и соответствующем ему токе фокусировки 620 мА, и это значение является минимально возможным для заданной конфигурации рабочей камеры, координатного столика и ЭЛП.

3. В результате анализа модели процесса ЭЛО при параметрах ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП, соответствующих минимальным значениям и рекомендациям для обработки керамики (сфокусированный пучок с током обработки 1 мА, что соответствует плотности мощности $1,9 \cdot 10^5$ Вт/см², импульсный режим с минимальной длительностью импульса 5 мс и временем паузы 100 мс) определено, что для получения сквозного отверстия в подложке из спеченной керамики ВК-94 толщиной 2,2 мм необходимо 7 импульсов, а в листе сырой ЛТСС марки КЕКО СК-47 толщиной 254 мкм всего 1 импульс.

4. При проведении обработки керамических материалов на установке ЭЛО «ЛУЧ» с ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП для обеспечения требований, предъявляемых по результатам проведенных расчетов, численного моделирования и литературным данным к размерной обработке керамики, а также с учетом конструктивных особенностей установки, рекомендуется использовать следующие значения основных технологических параметров: ток обработки 1 мА, длительность импульса 5 мс, время паузы 100 мс, температура предварительного нагрева 600°С.

5. Для экспериментального измерения диаметра пучка, а также определения состояния фокуса, на установке ЭЛО «ЛУЧ» с ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП и других установках подобного класса рекомендуется использовать метод вращающегося зонда, поскольку он позволяет проводить оценку при разных параметрах пучка без разгерметизации камеры и проведения измерений зоны обработки. Измеренный диаметр сфокусированного пучка в плоскости координатного стола составляет 0,747 мм, что подтверждает результат численного моделирования – 0,7 мм.

6. Для обработки спеченной керамики типа ВК-94 на установке ЭЛО «ЛУЧ» с ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП необходимо использовать предварительный нагрев образцов до температуры 600°C, импульсный режим обработки сфокусированным пучком со следующими значениями: ток обработки 1 мА, длительность импульса 5 мс, длительность паузы 100 мс, что обеспечивает сквозные отверстия правильной формы без термических деформаций вокруг, при этом интерквартильный размах составляет 5% от среднего значения диаметра.

7. Для обработки листов сырой ЛТСС типа КЕКО СК-47 на установке ЭЛО «ЛУЧ» с ЭЛП ЭЛТА-60.15ДП рекомендуется использовать режим сканирования сфокусированным пучком со следующими параметрами: ток обработки 1 мА, частота развертки 1200 Гц, скорость движения координатного стола 2 мм/с, с использованием защитной пластины (маски).

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Особенности электронно-лучевой микроразмерной обработки подложек из различных типов керамики / Чжо Я. [и др.] // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2023. Т. №3. С. 110-115. (0,75 п.л./0,15 п.л.).
2. Численное моделирование электронно-лучевой размерной обработки керамических подложек / Чжо Я. [и др.] // Научные технологии. 2022. Т. 23. № 4. С. 5-13. (1,19 п.л./0,40 п.л.).
3. Возможности получения отверстий в керамике импульсным электронным пучком / Чжо Я. [и др.] // Будущее машиностроения России 2022: сборник докладов. XV Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием), Москва, 21-24 сентября 2022 года. Том 1. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2023. С. 399-401. (0,28 п.л./0,14 п.л.).

4. Электронно-лучевая обработка отверстий в сырой LTCC / Чжо Я. [и др.] // Вакуумная техника, материалы и технология: Материалы XVI Международной научно-технической конференции (Коллективная монография), Москва, 12-14 апреля 2022 года / Под редакцией С. Б. Нестерова. Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Электровакuumные технологии». 2022. С. 152-155. (0,40 п.л./0,14 п.л.).
5. Исследование возможности получения отверстий в сырой LTCC электронным лучом / Чжо Я. [и др.] // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 4-8 апреля, 2022, Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана. М.: ООО «КванторФорм». 2022. URL: studvesna.ru?go=articles&id=3560. (0,22 п.л./0,22 п.л.).
6. Возможности электронно-лучевой установки «ЛУЧ» для размерной микрообработки стекла и керамических материалов / Чжо Я. [и др.] // Наноиндустрия. 2020. Т. 13. № S2. С. 122-131. (0,69 п.л./0,14 п.л.).
7. Possibilities of the Electron-Beam Machine «LUCH» for Dimensional Microprocessing of Glass and Ceramic Materials / Zhuo Y. [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2020. 781(1): 012014. (0,63 п.л./0,13 п.л.).
8. Применение сфокусированных электронных пучков для микро- и наноразмерной обработки / Чжо Я. [и др.] // В сборнике: Богатство России. Сборник докладов. 2019. С. 40-41. (0,19 п.л./0,06 п.л.).
9. Применение электронно-лучевой технологии для микро- и наноразмерной обработки / Чжо Я. [и др.] // В сборнике: Будущее машиностроения России. сборник докладов. Союз машиностроителей России, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. 2018. С. 314-316. (0,25 п.л./0,08 п.л.).