

- Металлургия, 1992.
11. Ефремов А. М., Светцов В. И., Рыбкин В. В. Вакуумно-плазменные процессы и технологии. – Иваново: Иван. гос. химико-технол. ун-т, 2006. – 260 с.
  12. Купцов А. Д. Проблемы магнетронного распыления при обработке технологии формирования тонкопленочных покрытий меди в вакууме. VIII Международная научная конференция для молодых ученых «Наукоемкие проекты и технологии в машино- и приборостроении, медицине». Саратов, 3 – 5 декабря 2018 г.
  13. Купцов А. Д. Анализ и решение проблем при магнетронном распылении на установке УВН-1М. [Электронный ресурс] // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 8 – 12 апреля, 2019, Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана. – М.: ООО «Квантор Форм», 2019. – № гос. регистрации 0321900970. – URL: studvesna.ru?go=articles&id=2595 (Дата обращения: 20.04.2019).

## Возможности электронно-лучевой установки «ЛУЧ» для размерной микрообработки стекла и керамических материалов

*Я. Чжо, М. Лян, К.М. Моисеев, Л.Л. Колесник, Ю.В. Панфилов  
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1  
e-mail: k.moiseev@bmstu.ru, kolesnik@bmstu.ru, panfilov@bmstu.ru*

*В статье представлены современные применения и преимущества электронно-лучевой технологии в обработке стекла и керамических материалов. Рассмотрена конструкция и технологические возможности вакуумной установки «ЛУЧ» для электронно-лучевой плавки, сварки и размерной микрообработки электровакуумного стекла и керамических материалов, в том числе LTCC керамики.*

*Possibilities of the electron-beam machine «LUCH» for dimensional microprocessing of glass and ceramic materials. Y. Zhuo, M. Liang, K.M. Moiseev, L.L. Kolesnik, Yu. V. Panfilov. The article presents the modern applications and advantages of electron beam technology in the processing of glass and ceramic materials. The design and technological capabilities of the vacuum machine «LUCH» for electron beam melting, welding and dimensional microprocessing of vacuum glass and ceramic materials, including LTCC ceramics, are considered.*

### Введение

Технология электронно-лучевой обработки известна и применяется уже более 60 лет, но интерес со стороны науки и промышленности продолжает возрастать [1]. Одним из наиболее интересных, но пока малоиспользуемых применений, является микро- и наноразмерная обработка [2-4].

В электронной промышленности и приборостроении электровакуумное и оптическое стекло и керамические материалы используются при изготовлении деталей и узлов электронных приборов. Но технология плавки, сварки и размерной обработки электровакуумного стекла не всегда соответствует современным требованиям. Например: при сверлении керамических материалов, в том числе низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC), используемых для изготовления подложек микроволновых устройств, традиционными методами (механическим и лазерным методам), диаметр отверстия составляет до 50 микрон [5], однако для дальнейшей миниатюризации электронных устройств размеры должны уменьшаться до 30 мкм и меньше [6].

ЛТСС используется в различных отраслях промышленности на протяжении многих лет. Данная керамика применяется в качестве подложек сверхвысокочастотных устройств, используемых для создания микроволновых излучающих устройств, например, Bluetooth и Wi-Fi модулей. Усовершенствование ЛТСС материалов, технологических процессов и методов производства привело к снижению стоимости и улучшению технических характеристик электронных изделий. Это существенно увеличило интерес к ЛТСС технологии со стороны производителей высокочастотной техники, оптоэлектроники и микро электромеханических систем. Новые возможности открываются для производства электронных изделий в таких направлениях, как телекоммуникации, медицина, автомобильная техника [7].

Электронно-лучевая обработка по сравнению с механической лишена таких недостатков, как изменение размеров отверстий при износе инструмента и необходимость смены инструмента при изменении профиля отверстия, а по сравнению с лазерной – отсутствие конусности отверстий и изменение состава материала в зоне возле обработки [8-11].

Основные трудности, возникающие при электронно-лучевой обработке диэлектриков, связаны с низкой электропроводностью данных материалов [12,13]. Низкий коэффициент электропроводности диэлектрика приводят к накоплению заряда, снижающему энергию электронов пучка, вызывающему расфокусировку и искажение формы, а также увеличение диаметра пучка. Генерирование электронного пучка в диапазоне давлений от 5 до 20 Па приводит к образованию в зоне обработки плазмы, которая обеспечивает стекание заряда с обрабатываемого диэлектрического объекта [14, 15].

Кроме размерной микро- и нанообработки, высокоэнергетичные электронные пучки могут успешно использоваться и для других видов обработки стекла и керамических материалов. Использование электронно-лучевого нагрева при резке и сварке деталей из электровакуумного стекла и керамических материалов обеспечивает неизменный химический состав материала в зоне сварочного соединения. При плавке электронно-лучевой нагрев позволяет исключить влияние окружающей среды на состав и структуру материала, и делает возможным более точное управление его свойствами. Электронно-лучевая полировка создает дополнительные возможности модификации поверхности при существенном снижении шероховатости поверхности детали [16].

Для реализации технологий обработки изделий из электровакуумного стекла и керамических материалов, а также для дальнейших исследований по микро- и наноразмерной обработке ЛТСС керамики предъявлены основные требования к базовой технологии обработки и установке для их реализации (таблицы 1 и 2).

Таблица 1. Основные требования к технологии.

Параметр	Значение
Виды обработки стекла	Сварка, плавка, размерная обработка
Форма изделий	Трубчатая, плоская
Скорость сварки, см/мин.	1,0
Глубина провара, мм	до 5,0

Таблица 2. Требования к параметрам установки.

Параметр	Значение
Габаритные размеры установки, м	2,0×2,0×3,0
Рабочий объем вакуумной камеры, м <sup>3</sup>	0,3
Потребляемая мощность, кВА	10,0
Управление	Автоматизированное
Давление в рабочей камере, Па	5,0 – 20,0

### **Вакуумная установка**

В состав технологической установки «ЛУЧ» (рис. 1) входят вакуумная камера со средствами откачки и управления, смонтированная на единой раме, внутрикамерная оснастка

для закрепления, вращения и перемещения обрабатываемых изделий, электронный источник (пушка) и блок управления электронным источником.



*Рис. 1. Электронно-лучевая установка «ЛУЧ».*

Вакуумная система установки оснащена безмасляными средствами откачки и обеспечивает предельное давление в камере  $5,0 \cdot 10^{-4}$  Па. Вакуумная система состоит из следующих элементов: насос Edwards XDS35i; насос Edwards EH250; насос Edwards STPXA4503C ISO320F; затвор VAT Series 14 DN320 (14050-PE44); четыре клапана VAT Series 26 DN63 (26436-QE41); три клапана VAT Series 26 DN25 (26428-KE41); датчик давления широкодиапазонный Edwards WRG-S; датчик давления термодатный Edwards APG-100; шкаф управления. Технические характеристики установки приведены в таблице 3.

Таблица 3. Технические характеристики установки

Параметр	Значение
Объем вакуумной камеры, м <sup>3</sup>	0,3
Предельное остаточное давление, Па: - при использовании форвакуумных насосов; - при использовании высоковакуумного насоса	5,0·10 <sup>-1</sup> 5,0·10 <sup>-4</sup>
Суммарный поток натекания и газоотделения, Па×м <sup>3</sup> /сек	5,0·10 <sup>-3</sup>
Число каналов подачи технологических газов	2
Диапазон расхода технологического газа по каждому из каналов, sccm	10,0 – 200,0
Диапазон рабочих давлений, Па	1,0 – 25,0
Время откачки до давления 5,0·10 <sup>-1</sup> Па, мин	5
Время откачки до давления 5,0·10 <sup>-4</sup> Па, мин	15

Вакуумная камера имеет систему водяного охлаждения стенок, верхней и нижней плиты. На верхней плите рабочей камеры располагается фланец для установки электронно-лучевой пушки и устройства ее вертикального перемещения. Дверь камеры имеет систему водяного охлаждения. На двери камеры расположено окно диаметром 200 мм, выполненное из материалов, которые обеспечивают защиту от ионизирующих излучений.

В модуле управления расположены элементы контроля: система пуска вакуумных насосов, система управления и регулирования клапанов. Основной частью модуля управления является специализированный промышленный контроллер, обеспечивающий передачу данных по стандарту Ethernet между сервером и блоками управления исполняющих механизмов.

Электрооборудование установки состоит из систем управления откачкой, измерения давлений в характерных точках установки, питания и управления электронно-лучевым

источником, напуска технологических газов в объем вакуумной камеры, позиционирования заготовок/изделий внутри вакуумной камеры относительно электронно-лучевого источника, видеонаблюдения за технологическим процессом, а также централизованного контроля и визуализации параметров работы установки.

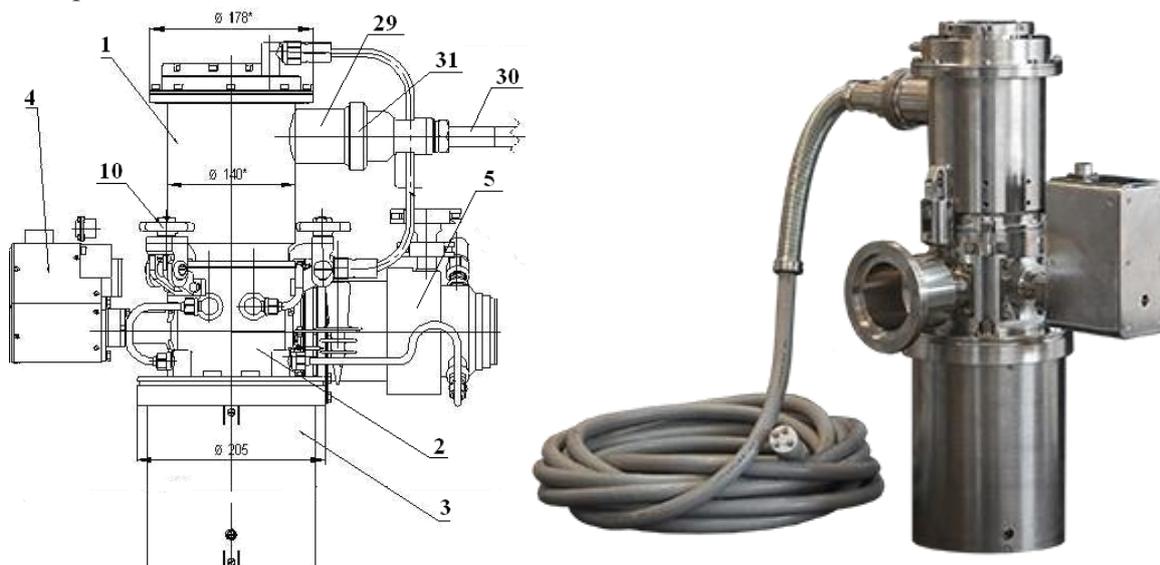
Одним из преимуществ плазменных источников электронных пучков является возможность их эксплуатации в условиях среднего вакуума, однако разрабатываемая технология не предполагает изменения химического состава материала в зоне обработки. Исходя из этого, возникает необходимость не просто откачки рабочего объема до необходимого давления, но и обеспечения замещения состава остаточной атмосферы в рабочей камере инертным газом. С этой целью в конструкции изделия предусмотрена система подачи газа с регуляторами расхода.

Система напуска газов в объем вакуумной камеры состоит из двух идентичных каналов. В состав канала газонапуска входят отсечной клапан и регулятор массового расхода газа фирмы Brooks. Обеспечиваются следующие режимы работы:

- два независимых канала подачи газа, каждый из которых поддерживает заданный для него расход газа;
- один канал работает в режиме фиксированного расхода газа, другой – в режиме стабилизации давления в камере;
- оба канала работают в режиме стабилизации давления в камере, поддерживая заданное соотношение между массовыми расходами по каналам.

#### **Электронно-лучевая пушка**

Электронно-лучевая пушка "ЭЛТА-60" производства компании "Текарте" представлена на рис. 2. Источник электронов 1 предназначен для создания и формирования электронного луча. В промежуточном корпусе 2, являющемся связующим звеном между источником электронов и фокусирующе-отклоняющей системой, установлен механизм шлюзования 4, который служит для отсечения объема источника электронов от остального объема пушки. Фокусирующе-отклоняющая система 3 предназначена для фокусировки и отклонения электронного пучка при обработке. Вакуумная система предназначена для дифференциальной откачки пушки, и состоит из углового вакуумпровода с фланцем для подключения турбомолекулярного насоса (ТМН) 5. Система охлаждения пушки соединяется последовательно с системой охлаждения ТМН. Вакуумная система обеспечивает в источнике электронов давление не выше  $10^{-2}$  Па.



*Рис. 2. Внешняя конструкция электронно-лучевой пушки "ЭЛТА-60": 1 – источник электронов; 2 – промежуточный корпус; 3 – фокусирующе-отклоняющая система с двойным преломлением луча; 4 и 5 – вакуумная система.*

Эмитированные нагревателем электроны ускоряются напряжением порядка 1 кВ и бомбардируют катод, разогревая его. В качестве источника электронов используется таблетка из гексаборида лантана.

Регулировка и стабилизация тока электронного луча производится изменением напряжения смещения на управляющем электроде. Для фокусировки и отклонения электронного луча служат фокусирующая линза и отклоняющая система двойного преломления. Источник электронов располагается вертикально на верхней плите камеры, электронный луч направлен вниз. Характеристики электронной пушки приведены в таблице 4.

Таблица 4. Характеристики электронной пушки.

Параметр	Значение
Величина ускоряющего напряжения, кВ	60±1
Диапазон изменения тока сварки, мА, не менее в режиме «сварка»	1-250
Частота модуляции тока, Гц	0 – 50
Максимальный угол отклонения, град., не менее	±10
Максимальный параллельный перенос электронного луча, мм, не менее	±12
Напряжение питания, В	380
Частота напряжения питания, Гц	50
Максимальная мощность, потребляемая аппаратурой, кВА	50
Минимальный диапазон изменения тока бомбардировки, мА	10-50
Расход воды для охлаждения, м <sup>3</sup> /сек	3,58·10 <sup>-4</sup>

#### Столик

Обрабатываемое изделие помещается на водоохлаждаемый столик (рис. 3), установленный внутри камеры на ее нижней плите. Столик оборудован шаговыми двигателями 1, 2, и обеспечивает перемещение обрабатываемого образца на 200 мм в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях, если же образец закреплен во вращающихся планшайбах 3, то обеспечивается его вращение вокруг оси, параллельной одной из осей горизонтального перемещения. Для фокусировки электронного луча на обрабатываемой поверхности предусмотрено вертикальное перемещение электронно-лучевой пушки на 100 мм. Выбранное решение позволяет проводить электронно-лучевую обработку как плоских, так и цилиндрических поверхностей изделий.

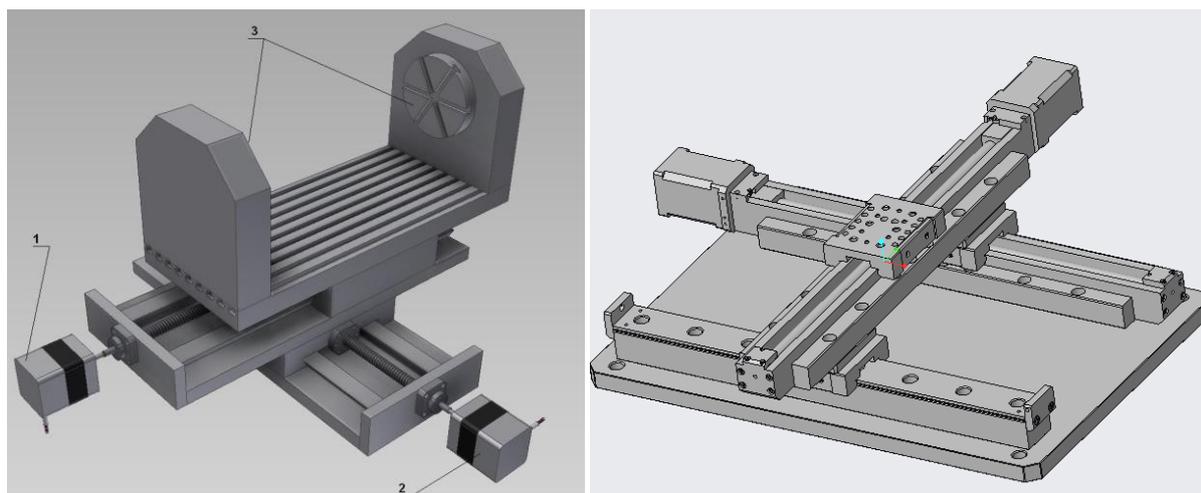


Рис. 3. Столик для размещения образцов (элементы защиты не показаны).

Система позиционирования служит для изменения положения заготовок/изделий внутри вакуумной камеры относительно электронно-лучевого источника, и включает двухкоординатный стол, шпиндель для вращения детали и привод перемещения электронно-

лучевого источника относительно детали в вертикальной оси с целью фокусировки электронного луча.

Система позиционирования состоит из четырех шаговых двигателей типа FL57STH, четырех драйверов шагового двигателя типа SMD-4.2, источников питания драйверов и четырех модулей расширения типа EM253 в управляющем контроллере. Контроллер задает необходимые скорости движения, времена разгона и торможения, проводит поиск референтных меток, отслеживает состояния датчиков крайних положений. Связь между контроллером и драйверами шаговых двигателей осуществляется по интерфейсу "Шаг/Направление".

### **Заключение**

Разработанная электронно-лучевая установка «ЛУЧ» реализует различные технологии обработки стекла и керамических материалов: плавку, сварку, резку, полировку и размерную микрообработку. Наиболее перспективными направлениями для исследований является размерная микрообработка LTCC керамики. Кроме того, благодаря своим характеристикам, установка имеет большой потенциал для использования в аддитивных технологиях.

### **Литература**

1. Węglowski MS, Błacha S, Phillips A. Electron beam welding – Techniques and trends – Review. Vacuum. 2016;130:72-92. doi:10.1016/j.vacuum.2016.05.004.
2. Hellberg S. et al. Micro Electron Beam Welding of the hybrid material combination Nitinol and stainless steel without filler material // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – VOL. 1089. – №. 1. – P. 012003.
3. Chen Y. Nanofabrication by electron beam lithography and its applications: A review // Microelectronic Engineering. – 2015. – VOL. 135. – PP. 57-72.
4. Spinney P. S. et al. Nanopore formation by low-energy focused electron beam machining // Nanotechnology. – 2010. – VOL. 21. – NO. 37. – P. 375301.
5. Перцель Я. М., Рудак Ю. А. Исследование возможности получения рисунка топологии толстопленочных LTCC-плат с помощью лазера // Техника радиосвязи. – 2015. – №. 3. – С. 90-96.
6. Hagen G., Rebenklau L. Fabrication of smallest vias in LTCC Tape // 2006 1st Electronic System Integration Technology Conference. – IEEE, 2006. – VOL. 1. – PP. 642-647.
7. Форостяный Д. А., Садков А. Б., Пономоренко С. Л. Разработка технологического процесса лазерной резки низкотемпературной совместно спекаемой керамики (LTCC) // Молодежный научно-технический вестник. – 2017. – №. 5. – С. 50.
8. Rebenklau L., Wolter K. J., Hagen G. Realization of  $\mu$ -Vias in LTCC Tape // 2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology. – IEEE, 2006. – PP. 55-63.
9. Wang G. et al. Fabrication of microvias for multilayer LTCC substrates // IEEE transactions on electronics packaging manufacturing. – 2006. – VOL. 29. – NO. 1. – PP. 32-41.
10. Kita J. et al. Laser treatment of LTCC for 3D structures and elements fabrication // Microelectronics International. – 2002. – VOL. 19. – NO. 3. – PP. 14-18.
11. Nowak K. M., Baker H. J., Hall D. R. Cold processing of green state LTCC with a CO<sub>2</sub> laser // Applied Physics A. – 2006. – VOL. 84. – NO 3. – PP. 267-270.
12. Филачев А. М., Фукс Б. И. Проблемы электронно-лучевой обработки диэлектриков // Прикладная физика. – 1996. – №. 3. – С. 39-46.
13. Rau E. I. et al. Complex investigations of effects of charging a polymer resist (PMMA) during electron lithography // Russian Microelectronics. – 2013. – VOL. 42. – NO 2. – PP. 89-98.
14. Медовник А. В. и др. Электронно-лучевая обработка керамики // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – №. 3. – С. 39-44.
15. Юшков Ю. Г. и др. Форвакуумный плазменный источник импульсных электронных пучков // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – №. 2. – С. 85-88.
16. Серба П. В. и др. Электронно-лучевая обработка оптических компонентов на основе боролантановых стекол, применяемых в приборе ориентации по Полярной звезде // Инженерный вестник Дона. – 2011. – Т. 18. – №. 4.