

Особенности электронно-лучевой микроразмерной обработки подложек из различных типов керамики

Я. Чжо¹, В. Масловский², К. Моисеев, к. т. н.³, И. Воробьев⁴, М. Назаренко⁵

УДК 537.533 | ВАК 2.2.2

Микроразмерная обработка керамических материалов при изготовлении изделий электронной техники является важным этапом технологического процесса. При этом ужесточение требований к конечным изделиям и их постоянная миниатюризация накладывают серьезные ограничения на традиционные методы механической и лазерной обработки.

В статье рассматриваются возможности альтернативного метода – электронно-лучевой обработки – и приводятся результаты экспериментальных исследований по обработке спеченной керамики ВК94-ДН и LTCC КЕКО SK-47.

Выдающиеся механические и физические свойства, такие как высокая термостойкость, высокая твердость и химическая стабильность, способствовали применению керамики во многих областях [1–3]. В электротехнической и радиоэлектронной промышленности керамические материалы часто используются в качестве подложек для электронных устройств или модулей, в том числе для ВЧ- и СВЧ-применений [4].

Вместе с тем высокая хрупкость и твердость керамики затрудняют ее обработку с использованием традиционных методов, а повреждение поверхности во время обработки влияет на качество получаемых изделий [5, 6]. В ряде случаев, в связи с постоянным ужесточением требований к электронным устройствам и их миниатюризацией, такие повреждения становятся критичными для функционирования конечных изделий.

Альтернативой подложкам из спеченной керамики является использование низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC – Low Temperature Co-fired Ceramics) благодаря малым диэлектрическим потерям на высоких частотах работы, что наиболее востребовано для ВЧ- и СВЧ-применений. Устройства, изготовленные с использованием LTCC, обладают высокой надежностью и относительной простотой сборки и монтажа компонентов [7–11]. Отличительной особенностью LTCC является то, что обработка происходит перед спеканием.

Сырая керамика мягче и легче обрабатывается, но, как и в случае с подложками из спеченной керамики, традиционные методы обработки LTCC также сталкиваются с различными проблемами [12, 13]. При получении отверстий в LTCC традиционными методами их диаметр составляет до 50 мкм [14, 15], однако для дальнейшей миниатюризации электронных устройств размеры должны уменьшаться до 30 мкм и меньше [16].

В настоящее время для получения отверстий в керамике применяют механическую или лазерную обработку [5, 16]. При механической обработке керамики происходит усиленный износ и образование сколов на кромках инструмента. При лазерной обработке наблюдается конусность отверстий и изменение состава материала в зоне возле отверстия, что значительно влияет на качество обработки [5, 6, 14, 15, 16].

Перспективным методом является электронно-лучевая обработка (ЭЛО) благодаря своим характеристикам – высокой плотности энергии, высокому КПД, высокой стабильности и др. [7–14]. В данной статье проводится исследование качества электронно-лучевой обработки подложек из LTCC и спеченной керамики ВК94-ДН на примере получения (сверления) отверстий в зависимости от параметров электронного луча.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по сверлению отверстий проводятся на установке электронно-лучевой обработки «ЛУЧ» [17], оснащенной электронно-лучевой пушкой ЭЛТА-60.15. Обрабатываемые материалы: лист LTCC КЕКО SK-47 толщиной 254 мкм и подложка толщиной 2,2 мм из керамики ВК94-ДН (ТУ 23.43.10-005-34576770-2018) производства российской компании GN Electronics, являющейся полным аналогом керамики ВК94.

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, аспирант, zhuooy@yandex.ru.

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, студент, maslovskyvn.nano@yandex.ru.

³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент, k.moiseev@bmstu.ru.

⁴ ООО «Джиэнаксель», коммерческий директор, sales@gnaxel.ru.

⁵ РТУ МИРЭА, аспирант, m.v.makarova@list.ru.

Для ВК94-ДН исследуются параметры электронного луча: количество импульсов, ток пучка, состояние фокуса, длительность импульса и паузы. Для уменьшения влияния термических напряжений проводится предварительный или сопутствующий нагрев подложек до 600 °С. Для LTCC КЕКО SK-47 исследуются параметры развертки электронного пучка. Для проведения исследований применялась керамика, произведенная и предоставленная компанией GN electronics.

Результаты экспериментов по сверлению ВК94-ДН

Количество импульсов. Параметры обработки: ток пучка $I_0=1$ мА, ток фокусировки $I_\phi=625$ мА, длительность импульсов $T_1=5$ мс, длина паузы $T_2=100$ мс, количество импульсов N от 200 до 999, рабочее давление в вакуумной камере $p \cdot 10^{-4}$ мбар. Результаты эксперимента представлены на рис. 1. С увеличением количества импульсов глубина отверстия увеличивается, а диаметр d отверстия изменяется незначительно. Это связано с тем, что длина паузы относительно велика, что снижает температуру расплавленной ванны. При 600 импульсах на обратной стороне керамики уже видны отверстия, но еще не сквозные. Это связано с тем, что при электронно-лучевой обработке расплавленная керамика не успевает испариться, а после обработки повторно затвердевает. Наиболее ровные и сквозные отверстия получаются при количестве импульсов 999.

Ток пучка. Количество импульсов $N=500$, ток фокусировки $I_\phi=625$ мА, ток пучка I_0 варьируется от 1 до 5 мА. Результаты эксперимента представлены на рис. 2. При увеличении тока пучка возрастает и подводимая энергия. Следовательно, увеличивается ванна расплава и, соответственно, становится больше диаметр отверстия. Одновременно с увеличением тока пучка увеличивается и диаметр пучка при неизменном токе фокусировки, что также приводит к увеличению диаметра отверстия. Наиболее ровные отверстия получаются при минимально возможном для данной электронно-лучевой пушки токе пучка $I_0=1$ мА.

Состояние фокуса пучка. Количество импульсов $N=500$, ток пучка $I_0=1$ мА, ток фокусировки I_ϕ варьируется от 615 до 635 мА. Результаты эксперимента представлены на рис. 3. При отклонении электронного пучка от фокусного, которое достигается для данных условий при токе фокусировки $I_\phi=625$ мА, диаметр отверстия увеличивается. В расфокусированном состоянии диаметр электронного пучка увеличивается, плотность энергии уменьшается, и, соответственно, также уменьшается глубина отверстия.

Длительность импульса и паузы. По мере увеличения длительности импульса подвод энергии в заготовку увеличивается, в результате получается большая ванна расплава, то есть отверстие большего диаметра (рис. 4).

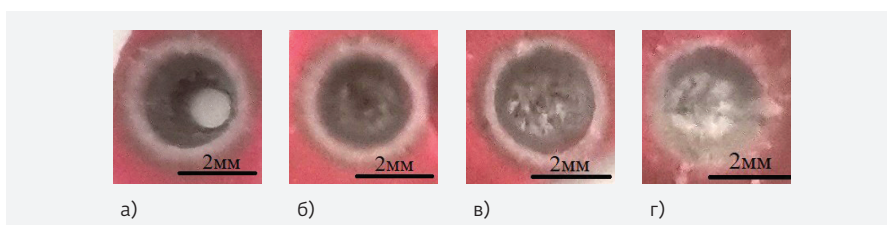


Рис. 1. Отверстия в подложке ВК94-ДН, полученные при разном количестве импульсов: а - $N=999$, $d=2,57$ мм; б - $N=600$, $d=2,56$ мм; в - $N=400$, $d=2,61$ мм; г - $N=200$, $d=2,78$ мм

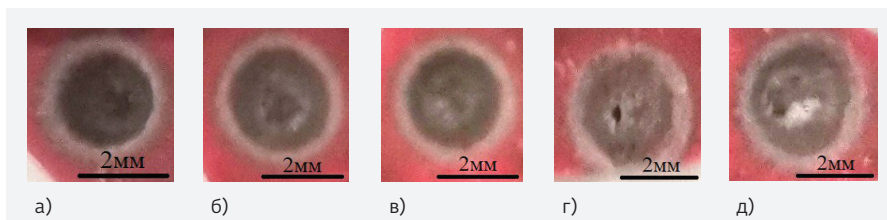


Рис. 2. Отверстия в подложке ВК94-ДН, полученные при разных токах пучка: а - $I_0=1$ мА, $d=2,31$ мм; б - $I_0=2$ мА, $d=2,62$ мм; в - $I_0=3$ мА, $d=2,70$ мм; г - $I_0=4$ мА, $d=2,81$ мм; д - $I_0=5$ мА, $d=3,26$ мм

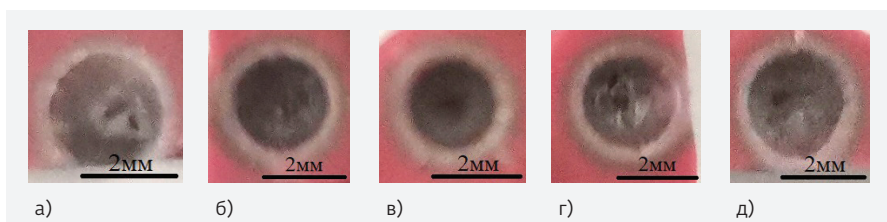


Рис. 3. Отверстия, обработанные при разных состояниях фокуса: а - $I_\phi=615$ мА, $d=2,54$ мм; б - $I_\phi=620$ мА, $d=2,50$ мм; в - $I_\phi=625$ мА, $d=2,31$ мм; г - $I_\phi=630$ мА, $d=2,57$ мм; д - $I_\phi=635$ мА, $d=2,67$ мм

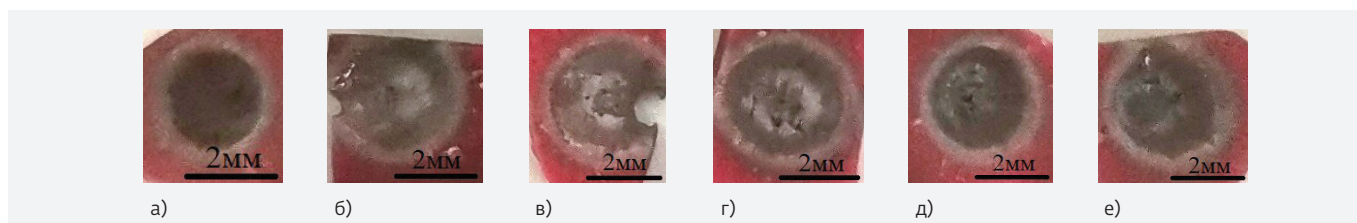


Рис. 4. Отверстия, обработанные при разной длительности импульса: а - $T_1=5$ мс, $d=2,31$ мм; б - $T_1=10$ мс, $d=3,15$ мм; в - $T_1=20$ мс, $d=3,53$ мм; г - $T_1=30$ мс, $d=3,58$ мм; д - $T_1=40$ мс, $d=3,61$ мм; е - $T_1=50$ мс, $d=3,71$ мм

Общее время воздействия увеличивается, больше материала испаряется, что увеличивает глубину отверстия при одном и том же времени процесса.

По мере того, как длительность паузы становится короче, тепло не успевает отводиться, что приводит к расширению ванны расплава и увеличению диаметра отверстия (рис. 5). Однако из-за особенностей электронно-лучевой пушки ЭЛТА-60.15 также существует определенный ток обработки при паузе $I_0=1$ мА. По мере дальнейшего сокращения длительности паузы общее энергозложение значительно снижается, диаметр и глубина отверстия уменьшаются.

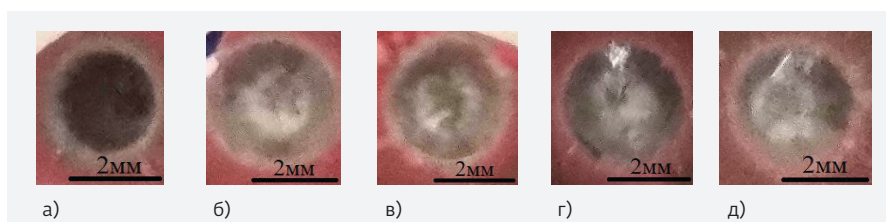


Рис. 5. Отверстия, обработанные при разной длительности паузы: а - $T_2=100$ мс, $d=2,31$ мм; б - $T_2=60$ мс, $d=3,10$ мм; в - $T_2=40$ мс, $d=3,27$ мм; г - $T_2=20$ мс, $d=3,10$ мм; д - $T_2=10$ мс, $d=2,83$ мм

Результаты экспериментов по сверлению LTCC КЕКО SK-47

Сырая LTCC обрабатывается электронным лучом через пластины из нержавеющей стали толщиной 2 мм с отверстиями диаметром 4 мм (рис. 6а) фокусированным электронным пучком с разверткой по прямой линии (рис. 6б). Пластина необходима для защиты необрабатываемой области керамической подложки от воздействия электронного пучка.

В отличие от спеченной керамики, обработку LTCC необходимо проводить при минимальном токе обработки $I_0=1$ мА. Однако количество подводимой энергии даже при минимальном токе слишком велико, поэтому его необходимо дозировать во времени. Это можно обеспечить за счет такого режима электронно-лучевой пушки, как развертка. В данном режиме возможно варьировать параметры развертки: частоту, длину и скорость. Различные сочетания этих параметров и определяют, с какой скоростью и в каком количестве будет подводиться тепло от электронного пучка к керамической подложке.

Частота развертки. Параметры обработки: ток обработки $I_0=1$ мА, ток фокусировки $I_\phi=633$ мА, длина

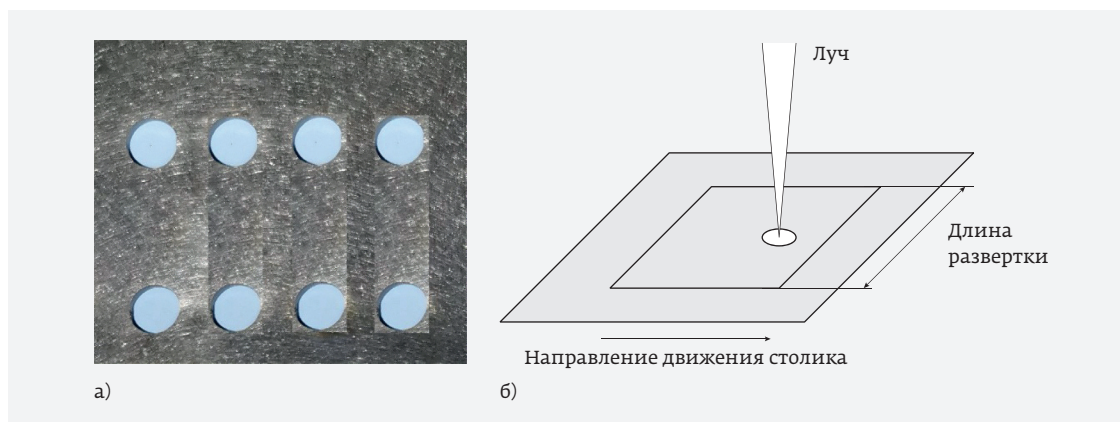


Рис. 6. Стальная пластина с отверстиями на листе LTCC (а) и схема обработки (б)

развертки 600 у. е., что соответствует зоне сканирования луча 30 мм, скорость движения столика с образцом в направлении, перпендикулярном развертке (сканированию) луча – 2 мм/с, частота развертки 20, 600, 1200 Гц, рабочее давление в вакуумной камере 10^{-4} мбар.

Результаты эксперимента по обработке сырой LTCC при различных частотах развертки электронного пучка представлены на рис. 7. На рис. 7а видно, что отверстие просверлено не полностью, часть материала осталась в отверстии и поменяла цвет на белый. На рис. 7б видно, что форма отверстия круглая, а диаметр совпадает с диаметром отверстия в стальной пластине, края отверстия неровные, черного цвета, заметна зона теплового воздействия. Цвет вокруг отверстия становится белым. На рис. 7в можно отметить меньшую зону теплового воздействия и менее деформированные края отверстия. При сканировании на низкой частоте интервал времени между электронным лучом, воздействующим на керамику, больше. При той же скорости сканирования большая часть материала не

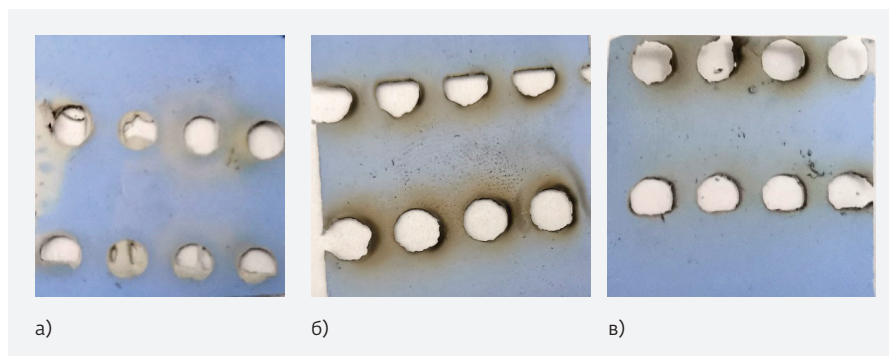


Рис. 7. Изображения отверстий при сверлении электронным лучом с разной частотой развертки: а – 20 Гц; б – 600 Гц; в – 1200 Гц

подвергается воздействию электронного луча, поэтому отверстие не просверливается полностью.

Длина развертки. Параметры обработки: ток обработки $I_0=1$ мА, ток фокусировки $I_f=633$ мА, частота развертки 50 и 1200 Гц, длина развертки варьируется от 600 до 999 у. е., скорость движения столика 2 мм/с, рабочее давление в вакуумной камере 10^{-4} мбар.

Результаты обработки при частоте развертки 1200 Гц приведены на рис. 8, а при частоте 50 Гц – на рис. 9.

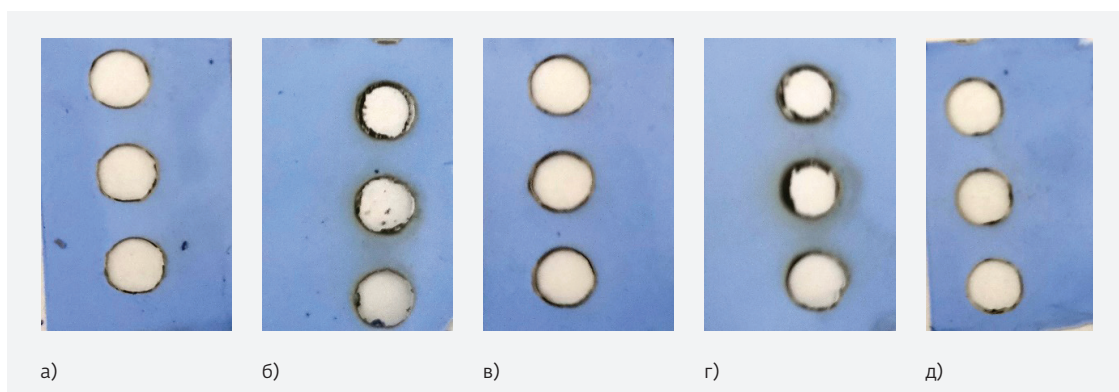


Рис. 8. Результаты обработки при частоте 1200 Гц и различных длинах сканирования (у. е.): а – 600; б – 700; в – 800; г – 900; д – 999

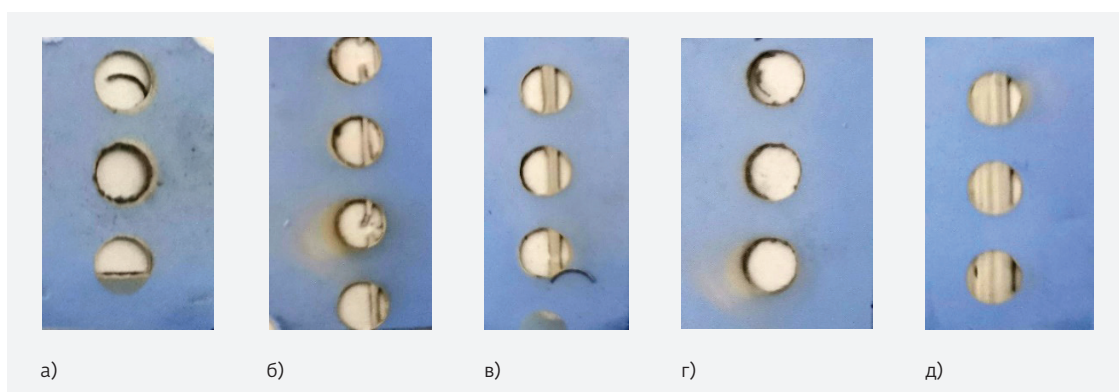


Рис. 9. Результаты обработки при частоте 50 Гц и различных длинах сканирования (у. е.): а – 600; б – 700; в – 800; г – 900; д – 999

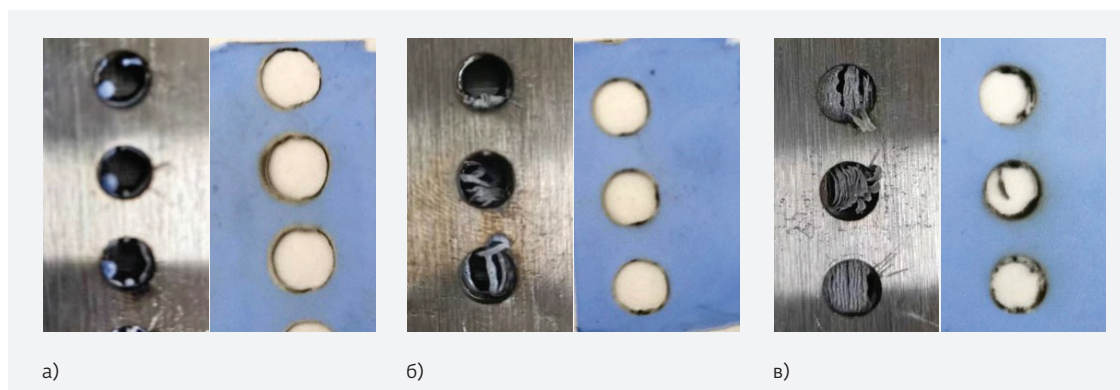


Рис. 10.
Результаты
обработки
при развертке
с разными
скоростями:
а – 1 мм/с;
б – 2 мм/с;
в – 3 мм/с

Из рис. 8 видно, что в процессе обработки с высокой частотой развертки (1200 Гц) с разной длиной сканирования отверстия получаются круглой формы, их диаметр такой же, как у отверстий в стальной пластине. При этом длина развертки мало влияет на качество обработки. Это связано с тем, что длина развертки незначительно влияет на количество подводимой энергии. Во время высокочастотного сканирования энергия равномерно распределяется по поверхности отверстия.

Однако при сканировании на низких частотах (50 Гц) отверстия просверливаются не полностью, часть материала остается в отверстии. Длина сканирования значительно влияет на качество обработки. Отверстия просверливаются на всю глубину при малой длине сканирования (рис. 9а). Это связано с тем, что распределение энергии во время низкочастотного сканирования неравномерно. При малой длине сканирования количество энергии достаточно, чтобы нагреть материал вокруг зоны сканирования до достаточной температуры. Это позволяет достичь лучшего качества обработки и полного испарения материала из отверстия. Когда длина сканирования велика, энергии недостаточно для нагрева материала вокруг зоны сканирования даже до температуры испарения сырой керамики. Чем больше длина сканирования, тем меньше энергия и тем больше материала остается в отверстии.

Скорость развертки. Параметры обработки: ток обработки $I_0 = 1$ мА, ток фокусировки $I_{\Phi} = 633$ мА, частота развертки 1200 Гц, длина развертки 999 у. е., скорость движения столика варьируется от 1 до 3 мм/с, рабочее давление в вакуумной камере 10^{-4} мбар.

Экспериментальные результаты (рис. 10) показывают, что с увеличением скорости сканирования подводимая энергия уменьшается. Как видно из рис. 10а, в отверстиях находится расплавленный керамический материал, свойства материала вокруг отверстия изменяются, а диаметр отверстия больше, чем диаметр отверстия на стальной пластине. На рис. 10б видно, что обрабатываемый материал частично расплавляется, а часть керамических

частиц теряет органический связующий материал и остается в отверстиях. При дальнейшем увеличении скорости сканирования энергия значительно снижается, и ее недостаточно для плавления и испарения керамических частиц, но органический связующий материал нагревается и разлагается с образованием газообразных соединений. Поскольку скорость нагрева слишком низкая, локальное давление газа не вытесняет несвязанные частицы Al_2O_3 и SiO_2 из нагретого материала заготовки в окружающей вакуум. Таким образом керамические частицы остаются в отверстиях (рис. 10в).

* * *

Таким образом, при обработке предварительно нагретой спеченной керамики ВК94-ДН импульсным электронным пучком получено отверстие правильной формы. Параметры импульсного электронного луча (количество импульсов, ток обработки, состояние фокуса, длительность импульса и паузы) влияют на качество обработки керамики. Для получения отверстий меньшего диаметра при обработке следует использовать сфокусированный луч с меньшим током обработки. Длительность импульса и паузы также в значительной степени влияет на качество обработки.

Используя защитную стальную пластину возможно получить отверстия в сырой ЛТСС фокусированным электронным пучком с разверткой по прямой линии. Отверстия получаются круглой формы, их диаметр такой же, как у отверстий в стальной пластине. Определено, что частота развертки, длина развертки и скорость движения существенно влияют на качество электронно-лучевой обработки. Для минимизации зоны воздействия газообразных связующих веществ ЛТСС и зоны термического влияния рекомендуется повышать частоту развертки электронного пучка для более равномерного нагрева. За счет изменения величины подводимой энергии основное влияние на качество обработки оказывают длина и скорость развертки электронного пучка.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Горохова Е.** Материаловедение и технология керамики. Litres, 2021.
2. **Samant A.N., Dahotre N.B.** Laser machining of structural ceramics – A review // Journal of the European ceramic society. 2009. V. 29. No. 6. PP. 969–993.
3. **Somiya S.** Handbook of advanced ceramics: materials, applications, processing, and properties. Academic press, 2013.
4. **Levinson L.** Electronic Ceramics: Properties: Devices, and Applications. CRC Press, 2020.
5. **Bharathi V., Anilchandra A.R., Sangam S.S., et al.** A review on the challenges in machining of ceramics // Materials Today: Proceedings. 2021. V. 46. PP. 1451–1458.
6. **Гусев В. В., Моисеев Д. А.** Износ алмазного шлифовального круга при обработке керамики // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2019. № 4. С. 25–29.
7. **Ненилина А. Ю., Беликов А. И.** Исследование проблем производства многослойных керамических плат на основе LTCC-технологии // Будущее машиностроения России. 2022. С. 267–270.
8. **Кондратьев Р.** LTCC – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика // НАНОИНДУСТРИЯ. 2011. № 2. С. 26–30.
9. **Борейко Д. А., Князева А. Р.** Особенности проектирования многослойных LC-фильтров на основе LTCC-технологии // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. 2022. С. 58–66.
10. **Li Y., Guo X.** A review on wireless sensors fabricated using the low temperature co-fired ceramic (LTCC) technology // Australian Journal of Mechanical Engineering. 2021. V. 19. No. 5. PP. 699–711.
11. **Wang D. et al.** A low-sintering temperature microwave dielectric ceramic for 5G LTCC applications with ultralow loss // Ceramics International. 2021. V. 47. No. 20. PP. 28675–28684.
12. **Черных В. и др.** Методы оформления отверстий в «сырых» LTCC и HTCC керамических картах // Компоненты и технологии. 2014. № 5. С. 188–191.
13. **Перцель Я. М., Рудак Ю. А.** Исследование возможности получения рисунка топологии толстопленочных LTCC-плат с помощью лазера // Техника радиосвязи. 2015. № 3. С. 90–96.
14. **Hagen G., Rebenklau L.** Fabrication of smallest vias in LTCC Tape // 2006 1st Electronic Systemintegration Technology Conference. IEEE, 2006. V. 1. PP. 642–647.
15. **Rebenklau L., Wolter K.J., Hagen G.** Realization of μ -Vias in LTCC Tape // 2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology. IEEE, 2006. PP. 55–63.
16. **Wang G. et al.** Fabrication of microvias for multilayer LTCC substrates // IEEE transactions on electronics packaging manufacturing. 2006. V. 29. No. 1. PP. 32–41.
17. **Zhuo Y. et al.** Possibilities of the Electron-Beam Machine "LUCH" for Dimensional Microprocessing of Glass and Ceramic Materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. V. 781. No. 1. P. 012014.



**ПОСТАВЩИК КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ
ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
И ДРУГИХ ВИДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

СПЕЦИАЛИЗИРУЕМСЯ НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ:



Объемная керамика



Металлизированные платы



Керамические подложки



Пьезоэлектрические элементы и кристаллы



Разработка решений

ОБЕСПЕЧИВАЕМ:

- оперативный запуск в производство
- оптимальное соотношение цена-качество
- соответствие продукции ГОСТ и ТУ
- соблюдение сроков
- индивидуальная разработка проектов любой сложности
- гарантии качества поставляемой продукции

ООО «Джиэнаксель»
+7 (499) 755-68-94
sales@gnaxel.ru

gnelectronics.ru