

УДК 621.373.826

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЕРФОРАЦИИ  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СОВМЕСТНО СПЕКАЕМОЙ КЕРАМИКИ НА  
ЛАЗЕРЕ LRS-150**

Андрей Борисович Садков<sup>(1)</sup>, Дмитрий Андреевич Форостяный<sup>(1)</sup>, Светлана Леонидовна Пономаренко<sup>(2)</sup>

Студент 5 курса<sup>(1)</sup>, студентка 3 курса<sup>(2)</sup>  
кафедра «Лазерные технологии в машиностроении»  
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Ю.В.Голубенко,  
кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в  
машиностроении»

**Введение**

Технология низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC) широко используется в различных отраслях промышленности. Данная технология представляет большой интерес со стороны производителей высокочастотной техники, оптоэлектроники и микроэлектромеханических систем. Новые возможности для LTCC открываются в таких направлениях как телекоммуникации, медицина, автомобильная, военная и космическая техника.

На сегодняшний день наиболее широко используется технология формирования отверстий в листе LTCC с помощью сверл, матриц и пуансонов, но данные технологии имеют ряд недостатков: износ инструмента (матриц, пуансон), замятие листов при обработке, изменение геометрических размеров вследствие износа. Данные недостатки отсутствуют при обработке лазерным излучением (отсутствует инструмент), что делает актуальным применение лазера в данной сфере.

**Описание существующей технологии изготовления изделия и возможное место лазерных технологий в ней**

Процесс производства изделия изображен на рисунке 1.



Рис.1. Существующая технология изготовления изделия

Данный процесс начинается с создания керамической суспензии путём смешивания керамического порошка, органических связующих, растворителей и модифицирующих добавок. Из суспензии впоследствии формируется керамическая лента. Лента нарезается на листы необходимых размеров и в листе вырезаются окна. Затем формируются переходные отверстия. В данной работе принято решение выполнить формирование переходных отверстий с помощью лазерного оборудования.

## Расчет режимов лазерной обработки

Расчет режимов производится на основе уравнения теплового баланса. Для обработки данной детали требуется плотность мощности выше  $q_3$ . Уравнение баланса энергии (уравнение Свифта-Хука-Джика):

$$W\eta = \rho V(c_1(T_{пл} - T_0) + L_{пл}) + \rho V(c_2(T_{исп} - T_{пл}) + L_u), \quad (1)$$

где  $W$  – энергия в импульсе;  $V = \delta\pi R^2$  – объем удаляемого материала;  $R$  – радиус отверстия;  $\delta$  – толщина керамического листа;  $c_1$  – удельная теплоемкость ниже температуры плавления;  $c_2$  – удельная теплоемкость выше температуры плавления;  $\rho$  – плотность обрабатываемого металла;  $L_{пл}$  – удельной теплота плавления;  $L_u$  – удельной теплота испарения;  $T_{пл}$  – температура плавления;  $T_{исп}$  – температура испарения;  $T_0$  – начальная температура (принято  $20^\circ\text{C}$ );  $\eta$  – эффективность процесса (принято значение 0,21);  $\eta = \eta_\varepsilon \cdot \eta_T$ , где  $\eta_\varepsilon$  – эффективный КПД,  $\eta_T$  – термический КПД.

Теплофизические свойства обрабатываемого материала представлены на рисунке 2.

- 1) Температура плавления  $T_{пл} = 2600^\circ\text{C}$
- 2) Температура кипения  $T_{кип} = 4297^\circ\text{C}$
- 3) Плотность  $\rho = 5700 \text{ кг/м}^3$
- 4) Удельная теплоемкость ниже  $T_{пл}$   $c_1 = 733 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$
- 5) Удельная теплоемкость выше  $T_{пл}$   $c_2 = 1273 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$
- 6) Удельная теплота плавления  $L_{пл} = 730 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$
- 7) Удельная теплота испарения  $L_u = 5220 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$
- 8) Коэффициент теплопроводности  $\lambda_T = 1,6 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$
- 9) Коэффициент температуропроводности  $a = 2,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$

Рис.2. Теплофизические свойства обрабатываемого материала

Используя выражение (1), получены значения энергии в импульсе  $W = 1,7 \text{ Дж}$ , мощности в импульсе  $P = 1700 \text{ Вт}$  и плотности мощности  $q = 5,41 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$ :

### Описание методики проведения экспериментов

Для проведения экспериментов использовалась лазерная установка LRS-150A компании «Булат». Данная установка имеет следующие характеристики, заявленные производителем:

Тип лазера: импульсно-периодический АИГ:  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ ; Максимальная энергия импульса излучения:  $70 \text{ Дж}$ ; Длительность импульса излучения:  $0,2 \dots 20 \text{ мс}$ ; Максимальная импульсная мощность излучения:  $10 \text{ кВт}$ ; Частота повторения импульсов излучения: до  $200 \text{ Гц}$ ; Максимальная мощность излучения:  $150 \text{ Вт}$ .

Для измерения энергии импульса использовался пирозлектрический датчик фирмы Orphig с максимально допустимой энергией в импульсе  $10 \text{ Дж}$ .

Перед проведением эксперимента, был подобран режим, при котором в листе формировалось сквозное отверстие. Далее были проведены эксперименты в три этапа:

- 1) При постоянной длительности импульса  $\tau = 1 \text{ мс}$  и количеством импульсов в одну точку  $N = 1$  изменялась энергия импульса  $W$ ;
- 2) При постоянной мощности импульса  $P = 1543 \text{ Вт}$  и количеством импульсов в одну точку  $N = 1$  изменялась длительность импульса  $\tau$ ;
- 3) При постоянной мощности импульса  $P = 564 \text{ Вт}$  и длительности импульса  $\tau = 0,5 \text{ мс}$  изменялось количество импульсов в одну точку  $N$ .

### Обобщение полученных результатов

После проведения эксперимента произведены измерения диаметров отверстий на входе и на выходе, а также посчитана конусность. Полученные результаты приведены в таблицах 1-3.

Таблица 1. Изменение энергии импульса

W, Дж	Диаметр отверстия		Конусность, С
	На входе	На выходе	
2,8	0,257	0,25	0,145
2,41	0,243	0,25	0,215
1,98	0,229	0,186	0,22
1,543	0,214	0,143	0,355
1,194	0,2	0,043	0,785
0,931	Нет сквозного отверстия		
0,632			

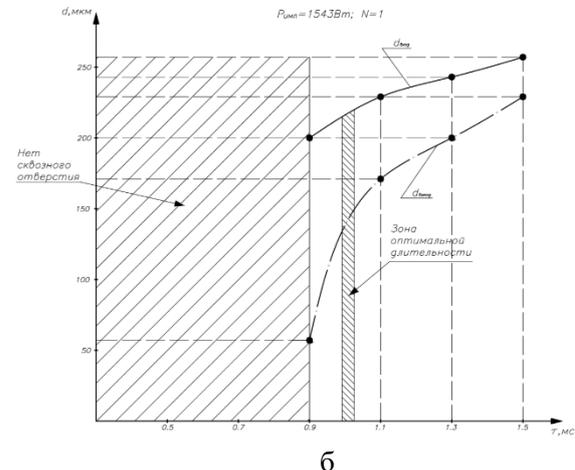
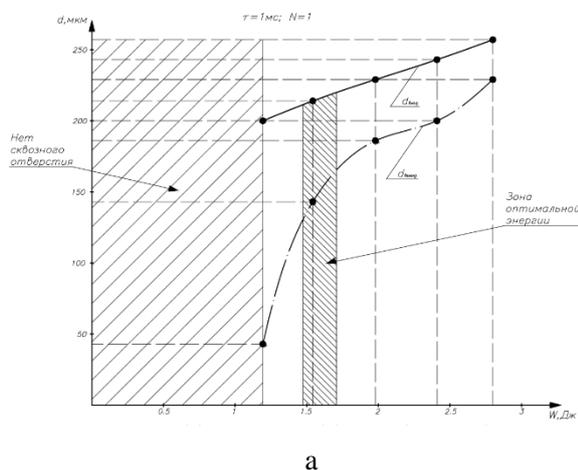
Таблица 2. Изменение длительности импульса

τ, мс	Диаметр отверстия		Конусность, С
	На входе	На выходе	
1,5	0,257	0,229	0,14
1,3	0,243	0,2	0,215
1,1	0,229	0,171	0,29
0,9	0,2	0,057	0,715
0,7	Нет сквозного отверстия		
0,5			

Таблица 3. Изменение количества импульсов

N, шт	Диаметр отверстия		Конусность, С
	На входе	На выходе	
5	0,214	0,071	0,715
4	0,2	0,057	0,715
3	Нет сквозного отверстия		
2			
1			

По результатам измерений построены графики зависимости диаметров входного и выходного отверстия от энергии импульса (рисунок 3а), зависимости диаметров входного и выходного отверстия от длительности импульса (рисунок 3б) и зависимости диаметров входного и выходного отверстия от количества импульсов (рисунок 3в).



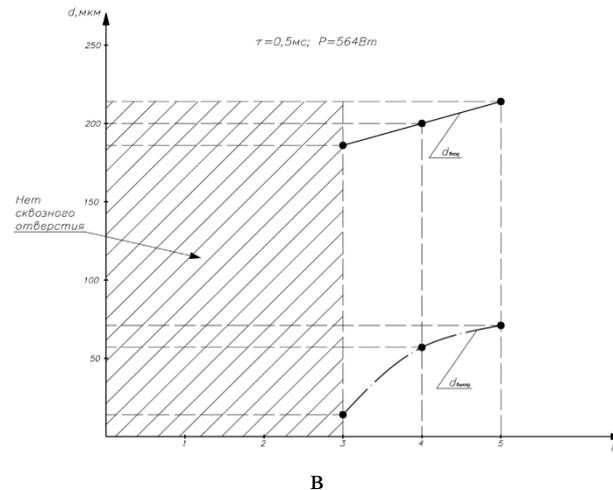


Рис. 3. Графики полученных результатов измерения

На первых двух графиках отмечены зоны оптимальных режимов. На последнем графике не удалось найти оптимальное количество импульсов для достижения требований так как было сделано недостаточно экспериментов.

### Заключение

В данной работе была подтверждена возможность применения лазерных технологий в производстве интегральных схем на низкотемпературной керамике, выполнено сравнение существующих методов формирования отверстий с методом лазерной обработки, выполнен расчет режимов лазерной, выполнена экспериментальная проверка расчетов и найдены оптимальные режимы обработки для выбранного лазерного оборудования.

### Литература

1. Кондратюк Р.И. Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика (LTCC). Преимущества. Технология. Материалы [Текст]/ Р.И. Кондратюк //Информационный бюллетень «Степень интеграции». – 2011. - № 5. – С. 14-17;
2. Егоров Г.И. Многослойные керамические микросхемы [Текст]/ Г.И. Егоров //Электроника: наука, технология, бизнес. – 2010. - № 3. – С. 60-65;
3. Исследование проблем производства СВЧ-компонентов на основе технологии низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC) [Электронный ресурс] / ПАО «Радиофизика». – Режим доступа: <http://www.radiofizika.ru/upload/konferentsiya-2015/Люттов%20Сударенко%20РИНЦ.pdf>, свободный. (Дата обращения: 15.12.16);
4. Григорьянц А.Г. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 7. Лазерная резка металлов: Учеб. пособие для вузов [Текст] / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов; Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988;
5. Григорьянц А.Г. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов: Учеб. пособие для вузов [Текст] / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов; Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк., 1988;
6. Свойства оксидов металлов [Электронный ресурс] / Thermalinfo. – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/oksidy/svoystva-oksidov-metallov>, свободный. (Дата обращения: 15.12.16);

7. LRS Automatic[Электронный ресурс] / ОКБ Булат. - Режим доступа:  
<http://www.laser-bulat.ru/products/lasersystems/lrs-automatic/#specs>, свободный. (Дата обращения: 15.12.16);