

# **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ LTCC**

С.А. Хохлун, А.И. Сидоров, С.В. Сидорова

## **АННОТАЦИЯ**

В данной статье представлены результаты исследования в области производства низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC), которая широко применяется во многих сферах микроэлектронной промышленности, в том числе и при создании вакуумплотных корпусов для датчиков различного назначения. Оценено влияние технологических режимов ключевых этапов производства на размеры керамических заготовок посредством математического моделирования и регрессионного анализа. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния плазменной обработки LTCC на гидрофильность поверхности.

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

LTCC, НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КЕРАМИКА, ИЗОСТАТИЧЕСКОЕ ПРЕССОВАНИЕ, ПЛАЗМЕННОЕ ТРАВЛЕНИЕ

## **TECHNOLOGICAL MODES ON THE LTCC-BASED PRODUCTS CHARACTERISTICS INFLUENCE**

S.A. Khokhlun, A.I. Sidorov, S.V. Sidorova

## **ABSTRACT**

This article presents the results of research in the field of production of Low-Temperature Co-fired Ceramic (LTCC), which is widely used in many areas of the microelectronic industry, including the creation of vacuum-tight enclosures for sensors. The influence of technological modes of key production stages on the size of ceramic blanks is estimated through mathematical modeling and regression analysis. The results of experimental studies of the effect of LTCC plasma treatment on the hydrophilicity of the surface are presented.

## **KEYWORDS**

LTCC, LOW-TEMPERATURE CERAMIC, ISOSTATIC LAMINATION, PLASMA ETCHING

## **ВВЕДЕНИЕ**

Низкотемпературная совместно спекаемая керамика (Low-Temperature Co-fired Ceramic, LTCC) – это совместное температурное преобразование компонентов керамики и металлизации при обжиге. Данный термин знаком специалистам в области компонентов электронной промышленности, и зачастую его не обозначают, а керамика называется низкотемпературной [1–7].

Благодаря своим высоким диэлектрическим свойствам LTCC чаще всего применяется при проектировании СВЧ устройств, в том числе и в качестве корпусов вакуумплотных датчиков. Во время процесса спекания керамики, используемой в LTCC, возникает усадка и деформация элементов [8–11]. Это может привести к искажениям размеров и формы, а также к напряжениям в структуре. Поэтому моделирование усадки является важным аспектом при проектировании изделий LTCC. Оно позволяет

предсказывать и анализировать эффекты усадки, оптимизировать конструкцию и добиться требуемой точности и надежности работы изделия [12–14].

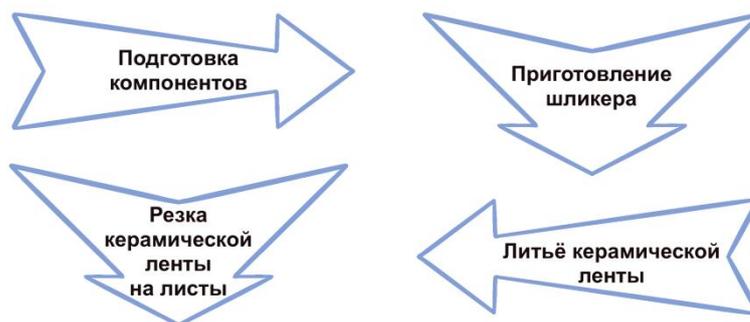
Следует отметить, что гидрофильность и гидрофобность поверхности керамики играет важную роль при металлизации, нанесении фоторезистивных масок и пайке компонентов. Одним из способов влияния на смачивание керамики является плазменная обработка. Исследование зависимости угла смачивания поверхности керамики от режимов плазменной обработки позволит рационально проводить технологический процесс и при необходимости корректировать его.

Целью данной работы является моделирование зависимости усадки низкотемпературной керамики от технологических режимов при изготовлении изделий электроники, а также исследование зависимости угла смачивания от режимов плазменного травления.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КЛЮЧЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НА УСАДКУ LTCC**

Производственный цикл LTCC (Рис.1) можно разделить на два этапа. Первый – изготовление сырых листов керамики, второй – непосредственное формирование трехмерной интегральной схемы. В зависимости от специфики выпускаемой продукции производители зачастую отказываются от некоторых этапов или меняют их местами.

### Этап 1 (изготовление «сырых» листов керамики)



### Этап 2 (формирование трехмерной интегральной системы)

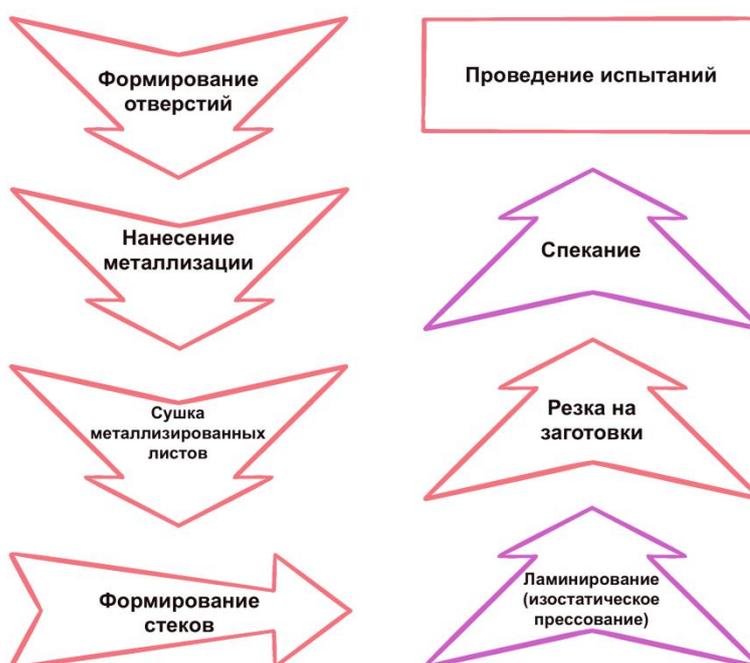


Рис.1. Технологический цикл производства LTCC

Ключевыми операциями являются изостатическое прессование и спекание керамики, которое производят после резки заготовок (Рис.2). Объектом исследований является зависимость линейной усадки изделий на основе низкотемпературной керамики после спекания от параметров изостатического прессования.

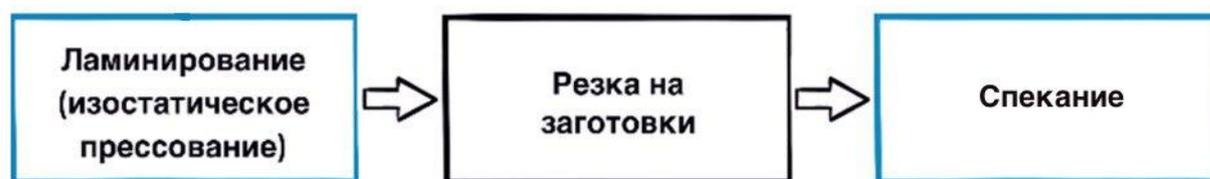


Рис.2. Ключевые операции технологического процесса изготовления плат LTCC

Для оценки влияния технологических режимов проводили изостатическое прессование при давлениях от 21 до 70 МПа и температуре от 60° до 80°С. Режимы

С.А. Хохлун, А.И. Сидоров, С.В. Сидорова Влияние технологических режимов на характеристики изделий на основе LTCC [Электронный ресурс] // Вестник РВО. – 2024. – № 2(4) (25.06.2024). – Режим доступа: <https://www.vestnik-rvo.ru/issues/2024-06/6108/>

операции спекания стека керамики не варьировали, так как температурный режим отработан с учетом компонентов керамики для получения необходимой структуры слоев.

Был проведен полный факторный эксперимент, в результате которого получена регрессионная зависимость линейного вида:

$$Y=14,12-1,42X_1-0,68X_2 \quad (1)$$

где  $Y$  – линейная усадка экспериментального образца по осям, %;  $X_1$  – давление в камере при изостатическом прессовании, б/р;  $X_2$  – температура в камере при изостатическом прессовании, б/р.

Из полученной регрессионной зависимости видно, что давление в камере оказывает большее влияние на уменьшение усадки керамики, чем температура. Для уменьшения усадки рекомендуется проводить процесс изостатического прессования при давлении 70 МПа и температуре 80°C. Так же взаимное влияние факторов оказалось не значимым на данном промежутке варьирования, что подтвердило гипотезу о линейной зависимости.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА УГОЛ СМАЧИВАНИЯ LTCC**

Для оценки и влияния на гидрофильность поверхности керамики проводили процесс плазменной обработки на установке плазменного травления TRION SIRUS T2 и оценивали угол смачивания керамики до и после процесса на Гониометре ЛК -1 (Рис.3.).



Рис.3. Установка плазменной обработки (а) и гониометр (б)

Первоначально подложки LTCC обрабатывали в плазме аргона (Рис.4.) и в смеси аргона и кислорода (Рис.5.). В результате оценки угла смачивания было определено, что обработка в плазме аргона не оказывает существенного влияния на изменение угла смачивания поверхности керамики.

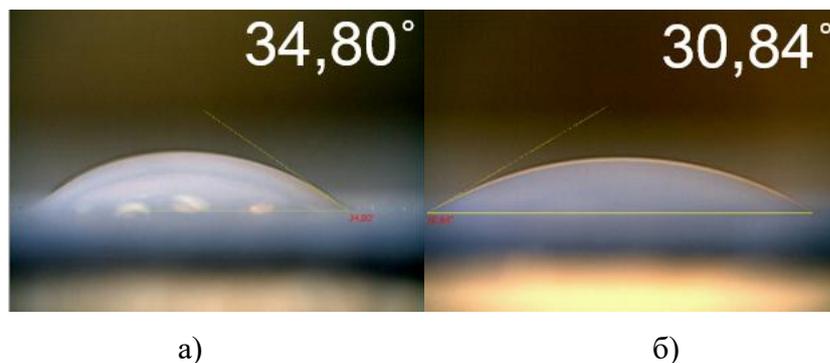


Рис.4. Угол смачивания керамической пластины до (а) и после (б) плазменной обработки в плазме аргона

Было принято проводить испытания в смеси аргона и кислорода, меняя соотношение газов в потоке рабочей среды.



Рис.5. Угол смачивания керамической пластины до (а) и после (б) плазменной обработки в смеси газов аргона и кислорода

Первая серия образцов была обработана в изостате при давлении 21 МПа и температуре 60°C, вторая – при давлении 70 МПа и температуре 80°C. После обработки результатов измерений угла смачивания для двух серий керамических пластин, были получены регрессионные зависимости:

$$Y_1 = 17,86 + 2,69X_1 + 3,90X_2 - 0,61X_3 - 2,45X_2X_3 - 0,88X_1X_3 - 0,95X_1X_2X_3 \quad (2)$$

$$Y_2 = 21,33 + 2,64X_1 + 4,34X_2 + 1,88X_3 - 0,96X_2X_3 - 1,47X_1X_3 - 1,35X_1X_2X_3 \quad (3)$$

где  $Y_1$  и  $Y_2$  – угол смачивания, °С;  $X_1$  – мощность плазмы, б/р;  $X_2$  – время плазменной обработки, б/р;  $X_3$  – содержание кислорода в смеси газов, б/р.

Полученные уравнения регрессии указывают на схожести физики процессов для обеих серий образцов, спрессованных при меньшем (21 МПа) и большем (70 МПа) давлении изостатического прессования. Однако четвертый коэффициент (выделено курсивом) перед фактором содержания кислорода в плазме имеет различие в знаке, что говорит об обратном влиянии увеличения концентрации кислорода на угол смачивания. Так, для серии керамических образцов, полученных при давлении изостатического прессования 21 МПа (2), с увеличением концентрации кислорода в плазме поверхность керамики становится более гидрофильной. А для серии керамических образцов, полученных при давлении изостатического прессования 70 МПа (3), с увеличением концентрации кислорода в плазме поверхность керамики становится более гидрофобной.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

1. Анализ технологического цикла изготовления изделий низкотемпературной керамики показал, что ключевыми операциями, влияющими на усадку керамики, являются изостатическое прессование и спекание.
2. Освоение технологического оборудования позволило поставить и провести экспериментальные исследования по оценке влияния давления и температуры изостатического прессования на усадку листов низкотемпературной керамики и влияния режимов плазменной обработки на гидрофильность поверхности низкотемпературной керамики.
3. Проведенные исследования влияния технологических режимов изостатического прессования на усадку низкотемпературной керамики подтвердили гипотезу о линейной зависимости и показали, что на интервале давлений изостатического прессования от 21 до 70 МПа при температуре от 60° до 80°С наибольшее влияние оказывает на усадку низкотемпературной керамики давление изостатического прессования, однако и температура является значимым фактором.
4. Проведенные исследования влияния технологических режимов плазменной обработки на изменение угла смачивания поверхности низкотемпературной керамики показали, что после обработки ЛТСС при более высоком давлении (70 МПа) в изостатическом прессе, травление в кислородсодержащей газовой среде менее эффективно по отношению к уменьшению угла смачивания.
5. При многократном увеличении давления вытеснение слишком большого количества жидкости из стека окажет существенное влияние на хрупкость изделия. Так как прочность является одним из существенных преимуществ продукции и компонентов, изготовленных на основе ЛТСС, то нахождение баланса между размерной точностью заготовок и прочностью конечных изделий является приоритетным направлением для исследований в этой области.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены основные этапы технологии производства электронных компонентов на основе низкотемпературной керамики. Исследовано влияние технологических режимов основных этапов технологии изготовления изделий из низкотемпературной керамики на усадку и деформацию компонентов изделий после обжига. Исследовано влияние технологических режимов плазменной обработки на гидрофильность поверхности керамики. Проведено математическое моделирование для процессов изостатического прессования и плазменной обработки. Получены регрессионные зависимости, позволяющие прогнозировать усадку и гидрофильность поверхности керамики.

В дальнейшем планируется проверка регрессионных зависимостей и составление рекомендаций по подбору технологических режимов для низкотемпературной керамики различной толщины стека, а также структурный анализ экспериментальных образцов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Pomeroy M. (ed.). Encyclopedia of materials: technical ceramics and glasses. – Elsevier, 2021.

2. Hilton A., Temple D. S. Wafer-level vacuum packaging of smart sensors //Sensors. – 2016. – Т. 16. – №. 11. – С. 1819.
3. Кондратюк Р. Деформация LTCC – изделий в процессе обжига // Вектор высоких технологий. 2016. №5 С. 48 – 55.
4. Richard E. Mistler, Eric R. Twiname. Tape Casting theory and practice // The American Ceramic Society. 2000. 293 p.
5. Черных В., Чигиринский С. Направления развития изделий из специальной керамики для производства электронной техники в России // Технологии электронной промышленности. 2012. №4. С. 176-182.
6. Чигиринский С. Особенности и преимущества производства многослойных структур на основе керамики (LTCC, HTCC, MLCC) // Компоненты и технологии. 2009. №11. С. 130-131.
7. King A.G. Ceramic technology and processing // William Andrew Publishing. 2002. 512p.
8. Хохлун С. Низкотемпературная многослойная керамика для изделий электроники // Всероссийская научно-техническая конференция студентов “Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии”. 2023. 2 с
9. Yoshihiko Imanaka. Multilayered Low Temperature Cofired Ceramics (LTCC) Technology // Springer Science + Business Media, Inc., 2005.
10. Нагаев Н. Тенденции развития металлокерамических корпусов //ЭЛЕКТРОНИКА наука| технология бизнес. – 2018. – №. 8 (00179).
11. А. Симин, Д. Холодняк, И. Вендик. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига, Ч.3. Активные устройства, антенны и многофункциональные СВЧ модули // Компоненты и Технологии. 2005. № 7. с. 208-213.
12. V. Piatnitsa, D. Kholodnyak et al Design and Investigation of Miniaturized High-Performance LTCC Filters for Wireless Communications // Proc. of EuMC37, Munich Germany, pp. 544 – 547, October 2007,
13. D. Kholodnyak, Ya. Kolmakov, I. Vendik, J.F. Trabert, J. Mueller, K.-H. Druue, M. A. Hein. Bandpass Filters for Ka-Band Satellite Communication Applications Based on LTCC // Proc. of EuMC38, Amsterdam, Netherland, pp. 211 – 214, October 2008.
14. Ворожцов А. Л., Петренко И. М., Юст П. А. Опыт применения технологии LTCC в реализации МШУ СВЧ диапазона в монолитном объёмном интегральном исполнении //СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2020. – №. 1-2. – С. 27-28.

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

Хохлун Святослав Андреевич – студент кафедры МТ-11, 4 курса. МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: hohlun2002@mail.ru

Сидоров Александр Иванович – начальник отдела. ООО «АКМ», г. Москва, e-mail: alex\_sidorov@bk.ru

Сидорова Светлана Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры (ORCID: 0000-0002-3002-1246). МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: sidorova\_bmstu@mail.ru