

УДК 666.3/7

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СОСТАВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ  
СВЯЗКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГИБКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ЛЕНТ  
АНАЛОГИЧНЫХ ПО СВОЙСТВАМ СОВРЕМЕННЫМ LTCC  
МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ  
СВЧ ДИАПАЗОНА**

**Д.А. Вайман, В.С. Данилов**

*Новосибирский государственный технический университет*

Статья посвящена исследованию и выявлению различных ключевых аспектов для разработки технологической связки и формирования гибких керамических лент, отвечающих всем современным требованиям аналогичных зарубежных LTCC материалов для создания электронных средств. Low temperature co-fired ceramic (LTCC) – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика обладает рядом свойств, которые необходимы для получения электронных изделий, в том числе работающих в СВЧ диапазоне [1–3]. В работе приведены результаты библиографического анализа как отечественной, так и зарубежной литературы в области разработки и изготовления технологических связок для керамики. Представлены базовая структура построения системы технологической связки, ее основные компоненты и оптимальные соотношения. Рассмотрены многие ключевые вопросы и режимы приготовления шликера для технологии литья тонких керамических пленок. В работе рассмотрены детали расчета керамического шликера, порядок загрузки компонентов, особенности перемешивания, технологические режимы и т. д. Для подтверждения результатов исследования произведены расчеты состава и режима приготовления технологической связки на примере керамики марки «ВК-96». На основании анализа термограмм было показано, что графики выделения энергии от температуры и массы от температуры полученных образцов идентичны с образцами LTCC керамики «А6М» фирмы «FERRO». Также «сырые» листы керамики ВК-96 имеют аналогичные механические свойства, хорошо подвергаются процессам обработки и позволяют сформировать сложные многослойные детали.

*Ключевые слова:* LTCC, технологическая связка, низкотемпературная керамика, керамическая пленка, шликер, пластификатор, диспергатор, мелющие тела.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-19-29

### **Введение**

Хорошие диэлектрические характеристики и низкий температурный коэффициент линейного расширения керамических материалов делают их привлекательными для применения в СВЧ электронике. Если не так давно, многие керамические материалы служили только основой (подложкой) для нанесения токопроводящих дорожек и установки навесных компонентов, то уже сегодня требуются не просто многослойные керамические СВЧ платы, но и целые трехмерные интегральные системы. Эту задачу на современном этапе развития электроники эффективно решает технология LTCC керамики, которая активно применяется по всему миру. Основное преимущество LTCC технологии заключается в возможности обработки и формирования интегральных структур на самых ранних стадиях формирования керамических изделий – перед обжигом. Так как большинство применяемых для производства керамики исходных веществ является непластичным, например оксиды, некоторые силикаты, шпинели, стеклокомпоненты и т. д., то для того, чтобы сформировать из порошков непластичных материалов изделие сложной структуры, необходимо придать им связанность, т. е. ввести технологическую связку.

Такая связка должна быть впоследствии удаляемой и выполнять свою функцию только на стадии формирования изделия, выгорая полностью при обжиге и не оставляя вредных для свойств изделия остатков. Именно поэтому развитие керамических технологий в последнее время направлено не только на получение сырьевых материалов высокого качества, но и на разработку технологических связок, которые позволяют обеспечить максимально точную и эффективную обработку керамики на стадии формирования изделий с использованием металлizationных слоев и нанесения некоторых пассивных компонентов, тем самым существенно увеличивая интеграцию и миниатюризацию изделий в целом [12–15].

В России LTCC керамику активно применяют для создания электронных приборов как гражданского, так и военного назначения, при этом собственного производства «сырых» керамических листов нет [1–3]. К тому же данные технологии держатся в строжайшем секрете и какой либо детальной информации, раскрывающей те или иные секреты, найти крайне затруднительно. Поэтому основной целью данной работы является исследование и разработка собственного состава технологической связки для создания «сырых» гибких керамических листов, аналогичных по свойствам современным LTCC материалам. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- провести теоретический обзор и определить основной состав компонентов технологической связки для литья тонких керамических пленок;
- произвести количественный расчет технологической связки для приготовления керамического шликера;
- на примере марки керамики ВК-96 получить «сырые» керамические листы и сравнить с образцами зарубежной LTCC керамики «Ferro ABM».

### 1. Методика эксперимента

Все современные технологии изготовления керамических изделий используют связующие вещества, чтобы удерживать частицы керамического порошка в подвешенном состоянии. Технология литья керамической пленки является единственным процессом, которому требуются связующие вещества для формирования гибкой пленки, даже после сушки листы керамики должны быть достаточно прочными и эластичными, чтобы в последующем выдержать различные виды обработки [15–18]. Чтобы осуществить процесс литья керамической пленки, необходимо придать керамическому порошку свойства жидкости, для этого добавляют целый комплекс различных компонентов. В литературном источнике [16] приводят следующие основные компоненты связки: растворитель, диспергатор, связка и пластификатор. Каждый компонент данной системы оказывает влияние на «сырую» керамическую ленту и обеспечивает такие характеристики как прочность, гибкость, пластичность, способность ламинироваться, жесткость, совместимость для трафаретной печати и т. д.

Для проведения исследования произведен расчет керамического шликера для LTCC керамики. В качестве емкости для перемешивания компонентов технологической связки использовалась банка фирмы «Vink Lisse» объемом 6,4 л. По данным производителей валковых мельниц для перемешивания шликера, рекомендуемый объем загрузки должен быть не более  $2/3$  от объема банки [6]. Следовательно, общий объем загрузки равен:  $6,4 \text{ л} \cdot 2/3 = 4,27 \text{ л}$ .

Мелющие тела выбраны цилиндрической формы, их диаметр 10 мм. Объем мелющих тел должен составлять не более  $1/3$  от объема общей загрузки [4, 5, 16, 18]. Так как объем общей загрузки равен 4,27 л, объем мелющих тел равен:  $4,27 \text{ л} \cdot 1/3 = 1,42 \text{ л}$ . Экспериментально установлено, что масса данных мелющих тел объемом 1,42 л составляет примерно 3400–3500 г.

Оставшийся объем для загрузки всех компонентов («сухих» компонентов, растворяющих, диспергатора, связующего, пластификатора) равен:  $4,27 \text{ л} - 1,42 \text{ л} = 2,85 \text{ л}$ .

Так как в литературном источнике [17] сказано, что вес мелющих тел должен быть равен весу «сухих» компонентов, то в данной работе вес «сухих» компонентов равен 3400 г. Под «сухими» компонентами понимаются порошковые материалы (глинозем, порошок стекла и т. д.). Требования к сухим компонентам очень детально описываются как во многих советских литературных источниках, так и во многих зарубежных [5–11, 16–18]. В данной работе для эксперимента подобраны порошковые материалы, имеющие средний размер частиц от 0,6 до 1,1 мкм и соотношение размера частиц не более 6 : 1.

Чтобы увеличить эффективность перемешивания и обеспечить более контролируемый процесс литья керамической ленты, выбрана бинарная система растворителей: этанол и толуол. Расчет массы растворителей произведен по формуле [16]

$$m_{\% \text{ загрузки}} = \left( \frac{m_{\text{порошка}}}{m_{\text{порошка}} + m_{\text{растворителей}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $m_{\text{порошка}}$  – масса «сухих» компонентов, г;  $m_{\text{растворителей}}$  – масса растворителей, г;  $m_{\% \text{ загрузки}}$  – общий % загрузки компонентов.

При условии, что общий % загрузки компонентов не должен превышать 70–80 %, то масса растворителей рассчитывается по формуле (1) и равна

$$70 \% = \left( \frac{3400}{3400 + m_{\text{растворителей}}} \right) \cdot 100 \%;$$

$$m_{\text{растворителей}} = \frac{3400 \cdot 100 \%}{70 \%} - 3400 = 4857 - 3400 = 1457 \text{ г}.$$

В литературном источнике [17] указано, что наиболее оптимальным соотношением по массе растворителей является 68 % этанола и 32 % толуола, следовательно:

$$m_{\text{этанола}} = \frac{68 \% \cdot m_{\text{растворителей}}}{100 \%} = \frac{68 \% \cdot 1457 \text{ г}}{100 \%} = 990 \text{ г};$$

$$m_{\text{толуола}} = \frac{32 \% \cdot m_{\text{растворителей}}}{100 \%} = \frac{32 \% \cdot 1457 \text{ г}}{100 \%} = 466 \text{ г}.$$

В качестве диспергатора используется специально подготовленный рыбий жир трансатлантической сельди – «Menhaden Fishoil Defloc Z3». В источнике [16] представлен эксперимент по выявлению зависимости вязкости шликера от количества добавляемого в него диспергатора. Результаты данного эксперимента с рыбьим жиром можно представить в виде формулы

$$m_{\text{р.жира}} = \frac{\mu_{\text{шликера}} \cdot m_{\text{порошка}}}{500\,000}. \quad (2)$$

Так как оптимальной вязкостью шликера для литья керамической пленки являются значения от 3000 до 3500 сП, следовательно, содержание рыбьего жира рассчитывается по формуле (2) и равно:  $m_{\text{р.жира}} = \frac{3500 \cdot 3400}{500\,000} = 23,8 \text{ г}$ .

В работах [5, 6, 16] в качестве связующего компонента выделяют две основные группы: полиакрилы и поливинилы. Полиакрилы позволяют получить высокую прочность сырой керамической ленты, но удаляются в нейтральных или в восстановительных средах, что требует специальных условий спекания. Поливинилы хорошо используются во многих областях промышленности. Для керамики по технологии литья пленки часто используют поливинилбутираль (ПВБ), он также применяется для нанесения порошковых красок, позволяет придать литейные свойства шликера и хорошо удаляется после предварительного обжига.

В данной работе используется «Поливинилбутираль PVB 98» в соотношении 1:10 относительно массы «сухих» компонентов [16–18]:  $m_{\text{ПВБ}} = \frac{m_{\text{порошка}}}{10} = \frac{3400 \text{ г}}{10} = 340 \text{ г}$ .

Так как все органические вещества влияют на усадку после спекания, которая по данным литературных источников [16–18] находится в пределах от 16,5 до 20 % (средняя 18,25 %), а «сухие» компоненты остаются после обжига, то общая масса органических веществ равна

$$m_{\text{орг.веществ}} = \frac{m_{\text{порошка}} \cdot 18,25 \%}{100 \%} = \frac{3400 \text{ г} \cdot 18,25 \%}{100 \%} = 650,5 \text{ г}.$$

Следовательно, масса пластификатора будет равна:

$$m_{\text{пластификатора}} = m_{\text{орг.веществ}} - m_{\text{ПВБ}} - m_{\text{р.жира}},$$

$$m_{\text{пластификатора}} = 650,5 \text{ г} - 340 \text{ г} - 23,8 \text{ г}.$$

Результаты расчета основных материалов и количественного состава компонентов технологической связки представлены в таблице.

#### Основные материалы шликера /

#### Basic materials of slip

№ п/п	Компоненты / Component	Наименование / Denomination	Производитель / Manufacturer	Масса г / Weight g
«Сухие» компоненты				
1	Мелющие тела	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 93 %	NTEC, Китай	3400
2	«Сухие» компоненты	Глинозем	Almatis, Германия	3250
		Стекло	—	
3	Прочие добавки	Каолин, тальк	Китай	150
Компоненты технологической связки				
4	Система растворителей	Толуол 99,5 %	Россия	466
		Этанол 99,8 %	Россия	990
5	Связующее	Поливинилбутираль PVB 98	Германия	340
6	Пластификатор	Бутилбензилфталат BBF S 261	США	257
7	Диспергатор	Рыбий жир Menhaden Fishoil Defloc Z3	США	23,8

Приготовление шликера произведено в три этапа:

этап 1 – загрузка «сухих» компонентов, растворителей, диспергатора и мелющих шаров. Скорость вращения банки составляла 62 оборотов в минуту и была определена по формуле [16]

$$N = 76,6 \cdot \sqrt{0,033 \cdot D},$$

где  $N$  – скорость вращения банки, об/мин;  $D$  – диаметр банки, см;

этап 2 – после 24 часов перемешивания «сухих» компонентов были добавлены связующее и пластификатор. Скорость вращения и время перемешивания были установлены так же, как и на этапе 1;

этап 3 – дегазация. Целью данного этапа является удаление воздуха и пузырьков из шликера. В данном случае дегазация осуществлялась с помощью медленного вращения банки шликера на валковой мельнице (~10 об/мин) в течение 12 часов.

Для приготовления использовались валковые мельницы «KEKO BL-3». Литье керамической пленки произведено на установке «KEKO CAM-M3520H», максимальная температура в камере составляла 50 °С. Резка пленки керамики осуществлялась на установке «KEKO SC-25MNC» в размер 8 × 8' (203 × 203 мм).

#### 4. Результаты

Полученные «сырые» листы керамики «ВК-96» обладают эластичностью и прочностью аналогичной листам керамики «Ferro А6М». Хорошо подвергаются различным процессам механической обработки и перфорации (рис. 1).

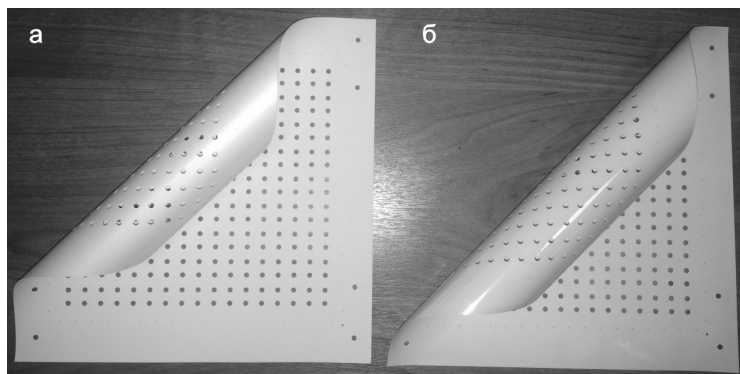


Рис. 1 – «Сырые» листы керамики после перфорации отверстий:  
а – Ferro А6М; б – «ВК-96»

Fig. 1 – Green ceramic tapes after punching holes:  
а – Ferro А6М; б – «VK-96»

С помощью прибора синхронного термического анализа «NETZSCH STA 449 F3 Jupiter» получены термографические диаграммы «сырых» листов керамики «Ferro А6М» и «ВК-96», результаты представлены на рис. 2 и 3.

Графики зависимости выделения энергии от температуры и изменения массы от температуры образцов «Ferro А6М» и «ВК-96» практически не отличаются, это свидетельствует о том, что данные на основе литературного анализа многих зарубежных источников позволили воспроизвести рецепт приготовления связки для керамического шликера аналогичного LTCC керамики фирмы «Ferro». По данным графикам можно сказать, что полное удаление органических компонентов технологической связки происходит при температуре ~500 °С. Также можно сделать

вывод о том, что образцы LTCC керамики, изготовленные с применением данной технологической связки, могут быть спечены по тому же температурному профилю, как рекомендуют для LTCC керамики «Ferro A6M».

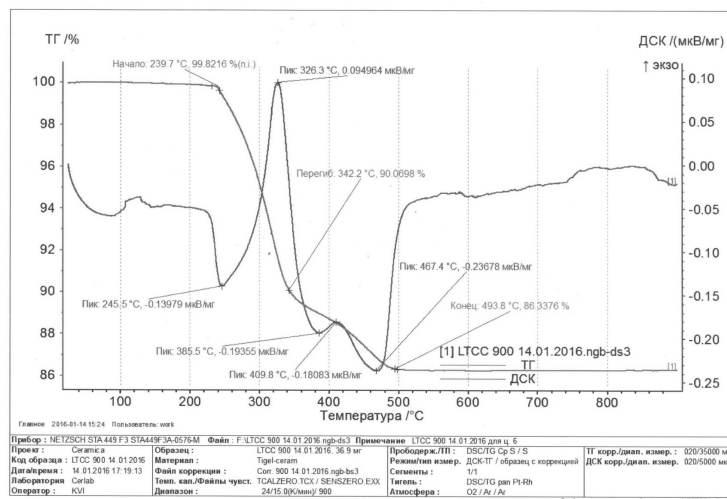


Рис. 2 – Термограмма «сырых» листов LTCC керамики «Ferro A6M»

Fig. 2 – A thermogram of LTCC ceramics green tapes from the «Ferro A6M» ceramics

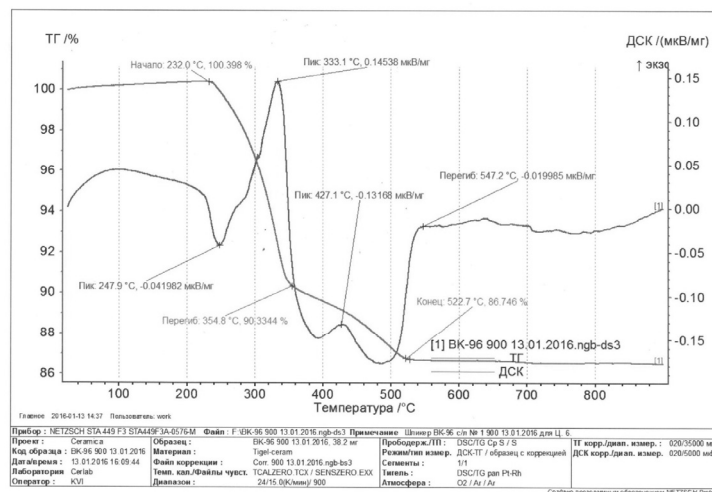


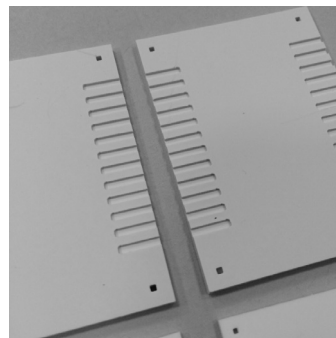
Рис. 3 – Термограмма «сырых» листов керамики «VK-96»

Fig. 3 – A thermogram of green «VK-96» ceramics tapes

При формировании деталей сложной формы из полученных образцов «сырых» листов керамики «VK-96» произведены сборка стеков, ламинирование и резка на заготовки (рис. 4). Отверстия и пазы на деталях после изостатического прессования сохранили свои форму практически без изменений, что свидетельствует о высокой способности данных «сырых» керамических листов к различным вариантам механической обработки и создания многослойных структур на ранних стадиях изготовления изделий.

Рис. 4 – «Сырые» заготовки керамических деталей из «VK-96»

Fig. 4 – Green samples from the «VK-96» ceramics



На заготовках произведены выгонка связки и спекание при температуре 1580 °С. Изделия спеклись равномерно, деформации и дефекты поверхности на деталях отсутствуют. Средняя геометрическая усадка по X и Y составила 19,32 % (рис. 5).

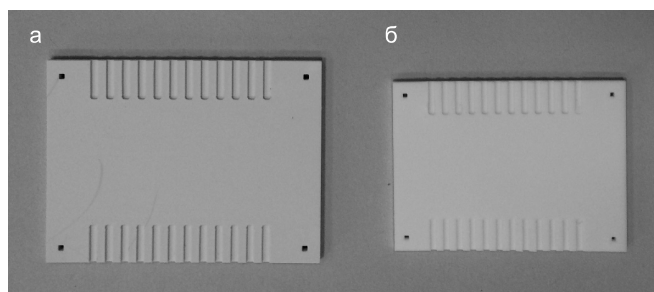


Рис. 5 – Детали из керамики «VK-96»:

а – до спекания; б – после спекания

Fig. 5 – The «VK-96» ceramics samples:

а – before sintering; б – after sintering

Чтобы убедиться, что данный состав технологической связки является оптимальным, произведена оценка влияния количества пластификатора на геометрическую усадку керамических образцов. Было осуществлено приготовление керамических шликеров с добавлением разного количества пластификатора. Результаты эксперимента представлены в виде графика (рис. 6).

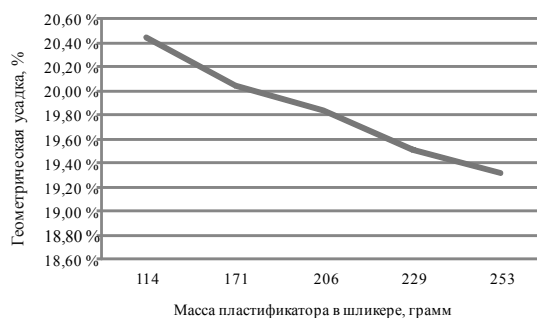


Рис. 6 – График зависимости геометрической усадки керамических деталей после спекания от количества пластификатора в шликере

Fig. 6 – The diagram of the plasticizer effect on the geometric size shrinkage.

Стоит отметить, что снижение количества пластификатора влечет за собой увеличение геометрической усадки и как следствие «сырые» керамические заготовки во время процесса спекания претерпевают значительные геометрические изменения, что негативно сказывается на готовых изделиях. Уменьшение доли пластификатора способствует нарушению процесса перемешивания технологической связки и «сухих» компонентов. Соответственно снижается плотность упаковки всей структуры при формировании «сырых» керамических лент и изделий на их основе.

### Заключение

В данной работе представлены исследование и разработка состава технологической связки для приготовления керамического шликера низкотемпературной совместно обжигаемой керамики. Методика расчета и приведенные формулы могут служить основой для построения многих других керамических систем формирования гибких керамических лент. По результатам видно, что система технологической связки является очень сложной и имеет ряд особенностей, влияющих не только на взаимодействие компонентов, но и зависит от технических характеристик оборудования. Анализ полученных образцов «сырых» керамических лент и сложных деталей на ее основе свидетельствует о том, что удалось воспроизвести состав технологической связки, который используется при создании «сырых» листов LTCC керамики «Ferro А6М». Изменение количества пластификатора в составе шликера в большую или в меньшую степень к улучшению характеристик «сырых» керамических листов и деталей на ее основе не привело. Все это свидетельствует о том, что состав компонентов, методика расчета и технологические режимы приготовления шликера для получения прочных и эластичных «сырых» листов керамики подобраны правильно и соотношение компонентов в данной системе находится в нужных пропорциях.

Низкотемпературная совместно обжигаемая керамика является уникальным материалом на сегодняшний день для создания электронных устройств с высокой степенью интеграции. Для ее реализации разработка состава связующих компонентов, аналогичного по свойствам современным производителям, является существенным шагом на пути к освоению производства LTCC керамики в России.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка отечественного керамического материала для изготовления изделий по технологии LTCC / Ю. Непочатов, С. Кумачева, Ю. Швецова, А. Дитц // Современная электроника. – 2014. – № 4. – С. 12–14.
2. Черных В., Чигиринский С. Направления развития изделий из специальной керамики для производства электронной техники в России // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2012. – № 4. – С. 176–182.
3. Пашков Д.А., Тютюнькова Д.О. Особенности состава и структуры современных LTCC материалов // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XII Международной конференция студентов и молодых ученых, г. Томск, 21–24 апреля 2015 г. – Томск, 2015. – С. 484–486.
4. Грехова М.В. Получение корундовых подложек для электроники методом пленочного литья // Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых с международным участием «Химия и химическая технология в XXI веке». – Томск, 2011. – Т. 1. – С. 19–20.
5. Химическая технология керамики: учебное пособие для вузов / под ред. И.Я. Гузмана. – М.: Стройматериалы, 2003. – 496 с.
6. Балкевич В.Л. Техническая керамика: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стойиздат, 1984. – 256 с.



7. Будников П.П., Гинстлинг А.М. Реакции в смесях твердых веществ. – М.: Стройиздат, 1965. – 487 с.
8. Дудеров Ю.Г., Дудеров И.Г. Расчеты по технологии керамики: справочное пособие. – М.: Стройиздат, 1973. – 80 с.
9. Гегузин Я.Е. Почему и как исчезает пустота. – М.: Наука, 1983. – 192 с.
10. Третьяков Ю.Д., Путляев В.И. Введение в химию твердофазных материалов: учебное пособие. – М.: Наука, 2006. – 400 с.
11. Хасанов О.Л., Бикбаева З.Г. Наноструктурированная керамика. Порошковые технологии компактирования конструкционных материалов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 41 с.
12. Zhou J. Towards rational design of low-temperature co-fired ceramic (LTCC) materials // Journal of Advanced Ceramic. – 2012. – Vol. 1 (2). – P. 89–99. – doi: 10.1007/s40145-012-0011-3.
13. Dubey M., Suri N., Khanna P.K. Optimization of shrinkage and surface-roughness of LTCC tape // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 2. – P. 441–444.
14. Sebastian M.T., Jantunen H. Low loss dielectric materials for LTCC applications: a review // International Materials Reviews. – 2008. – Vol. 53 (2). – P. 57–90.
15. Kita J., Moos R. Development of LTCC-materials and their applications – an overview // Proceedings 44th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials. – At Fiesa, Slovenia, 2008. – P. 219–224.
16. Mistler R.E., Twiname E.R. Tape casting: theory and practice. – Westerville, OH: American Ceramic Society, 2000. – 298 p.
17. Imanaka Y. Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology. – New York: Springer, 2005. – 229 p.
18. King A.G. Ceramic technology and processing. – Norwich, NY: William Andrew Publ., 2002. – 512 p.

## RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE LTCC COMPOSITION OF CERAMIC TAPE BINDER FOR FABRICATION HIGH FREQUENCY ELECTRONIC DEVICES

**Vayman D.A., Danilov V.S.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The article is devoted to research and identification of various key aspects for the development LTCC ceramic binder for the fabrication of flexible tapes. Low temperature co-fired ceramic (LTCC) has a number of properties that are necessary to manufacture electronic devices including those operating in a high frequency range [1-3]. The paper presents the results of a bibliographic review of Russian and foreign literature on the development and production of ceramic binders. The basic structure of the construction of a binder system, its main components and optimal relationships for "green" ceramic tapes are presented. The problems of interaction of various types of the binder system components with each other and their influence on the process of mixing as a whole are also considered. The paper presents the modes of preparation for the slip casting technology of thin ceramic tapes, the dependence of the binder recipe on the equipment, the order of components loading, mixing features, technological regimes, etc. The results of the study are confirmed experimentally by an example of the VK-96" ceramics manufacturing. The graph of the energy release depending on the temperature and the graph of the change in mass depending on the temperature of the obtained samples are similar to the LTCC sample of the A6M ceramics from the Ferro Company.

*Keywords:* LTCC, binder, low-temperature ceramics, ceramic tape, slip, plasticizer, dispersant, grinding bodies.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-19-29

## REFERENCES

1. Nepochatov Yu., Kumacheva S., Shvetsova Yu., Ditts A. Razrabotka otechestvennogo keramicheskogo materiala dlya izgotovleniya izdelii po tekhnologii LTCC [The development of the domestic ceramic material for the manufacture of devices on LTCC technology]. *Sovremennaya elektronika*, 2014, no. 4, pp. 12–14.
2. Chernykh V., Chigirinskii S. Napravleniya razvitiya izdelii iz spetsial'noi keramiki dlya proizvodstva elektronnoi tekhniki v Rossii [Directions of developing products on the basis of special ceramics for electronic technique in Russia]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes – Electronics: Science, Technology, Business*, 2012, no. 4, pp. 176–182.
3. Pashkov D.A., Tyutyunkova D.O. [Features of the composition and structure of modern LTCC materials]. *Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk: sbornik nauchnykh trudov XII Mezhdunarodnoi konferentsiya studentov i molodykh uchenykh* [Prospects of fundamental sciences development: XII International Conference of students and young scientists], Tomsk, 21–24 April, 2015, pp. 484–486. (In Russian).
4. Grekhova M.V. [Getting corundum substrates for electronics by tape casting]. *Materialy XII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem "Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya v XXI veke"* [Materials XII All-Russian scientific-practical conference of students and young scientists with international participation "Chemistry and chemical technology in the XXI century"]. Tomsk, 2011, pp. 19–20. (In Russian).
5. Guzman I.Ya., ed. *Khimicheskaya tekhnologiya keramiki* [Chemical technology of ceramics]. Moscow, Stroiimaterialy Publ., 2003. 496 p.
6. Balkevich V.L. *Tekhnicheskaya keramika* [Technical ceramics]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Stoiizdat Publ., 1984. 256 p.
7. Budnikov P.P., Ginstling A.M. *Reaktsii v smesnykh tverdykh veshchestv* [Reactions in mixtures of solids]. Moscow, Stoiizdat Publ., 1965. 487 p.
8. Duderov Yu.G., Duderov I.G. *Raschety po tekhnologii keramiki* [Calculations of ceramic technology]. Moscow, Stoiizdat Publ., 1973. 80 p.
9. Geguzin Ya.E. *Pochemu i kak ischezhaet pustota* [Why and how emptiness disappears]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 192 p.
10. Tret'yakov Yu.D., Putlyayev V.I. *Vvedenie v khimiyu tverdogfaznykh materialov* [Introduction to solid phase materials chemistry]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 400 p.
11. Khasanov O.L., Bikbaeva Z.G. *Nanostrukturirovannaya keramika. Poroshkovyye tekhnologii kompaktirovaniya konstruktsionnykh materialov* [Nanostructured ceramics. Powder technology of compacting structural materials]. Tomsk, TSU Publ., 2009. 41 p.
12. Zhou J. Towards rational design of low-temperature co-fired ceramic (LTCC) materials. *Journal of Advanced Ceramic*, 2012, vol. 1 (2), pp. 89–99. doi: 10.1007/s40145-012-0011-3.
13. Dubey M., Suri N., Khanna P.K. Optimization of shrinkage and surface-roughness of LTCC tape. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2013, vol. 2, pp. 441–444.
14. Sebastian M.T., Jantunen H. Low loss dielectric materials for LTCC applications: a review. *International Materials Reviews*, 2008, vol. 53 (2), pp. 57–90.
15. Kita J., Moos R. Development of LTCC-materials and their applications – an overview. *Proceedings 44th International Conference on Microelectronics, Devices and Materials*, At Fiesa, Slovenia, 2008, pp. 219–224.
16. Mistler R.E., Twiname E.R. *Tape casting: theory and practice*. Westerville, OH, American ceramic society, 2000. 298 p.
17. Imanaka Y. *Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology*. New York, Springer, 2005. 229 p.
18. King A.G. *Ceramic technology and processing*. Norwich, NY, William Andrew Publ., 2002. 512 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Вайман Дмитрий Александрович** – аспирант кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: разработка трехмерных структур на основе LTCC керамики для электронных устройств. Опубликовано 4 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: dima-1nsk@mail.ru).

**Vayman Dmitry Alexandrovich** – graduate student at the department of design and technology of radio electronic devices in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on the development of three-dimensional structures based on LTCC ceramics for electronic devices. He is the author of 3 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: dima-1nsk@mail.ru).



**Данилов Вячеслав Семенович** – канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: приборы СВЧ оптического диапазона. Опубликовано свыше 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: danilov\_vc@ngs.ru).

**Danilov Vyacheslav Semyonovich** – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the department of design and technology of radio electronic devices in Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on high frequency devices of an optical range. He has published over 50 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: danilov\_vc@ngs.ru).

*Статья поступила 11 апреля 2017 г.*

*Received April 11, 2017*

---

To Reference:

Vayman D.A., Danilov V.S. Issledovanie i razrabotka sostava tekhnologicheskoi svyazki dlya formirovaniya gibkikh keramicheskikh lent analogichnykh po svoistvam sovremennym LTCC materialam dlya sozdaniya elektronnykh sredstv SVCh diapazona [Research and development of the LTCC composition of ceramic tape binder for fabrication high frequency electronic devices]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 2 (39), pp. 19–29. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-19-29.