

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСОВ

О.Симонов¹

УДК 621.3
БАК 05.27.06

Использование корпусов на основе керамических материалов необходимо в тех случаях, когда к элементной базе предъявляются высокие требования в части надежности и эксплуатационных характеристик. Данная статья является кратким обзором современного уровня технологии производства металлокерамических корпусов. Кроме того, указаны основные направления текущих разработок по ее усовершенствованию. Технические параметры, приведенные в статье, относятся к изделиям известных японских производителей, уровень оснащенности производства которых и требования по выходному контролю соответствуют высоким стандартам и могут быть приняты за образец.

ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

В перечне многочисленных применений для металлокерамических корпусов в первую очередь необходимо отметить разнообразные интегральные микросхемы. Наиболее распространенными типами корпусов, которые при этом применяются, являются BGA, PGA (стандартно для микропроцессоров), DIP, LCC, QFP и т.д.

Для кварцевых резонаторов и ПАВ-фильтров (устройства, работающие на основе поверхностных акустических волн) применяются сравнительно небольшие металлокерамические корпуса типа CLCC (Ceramic Leaded Chip Carrier), которые хорошо подходят для поверхностного монтажа. Основным потребителем данного типа устройств сегодня стала телекоммуникационная техника. Применение ПАВ-фильтров в коммуникационном оборудовании, например, в сотовых телефонах, определяет высокие требования к уровню их миниатюризации.

Среди других типов устройств, которые активно применяются в телекоммуникациях, следует выделить высокочастотные (RF) и оптические модули, которые, как правило, используются в маршрутизаторах верхнего и среднего уровней. При высокоскоростной передаче данных актуальна проблема перегрева, поэтому корпуса

этих изделий имеют значительное удельное содержание металла – их металлические части при этом выполняют функцию теплоотвода.

Потребителем металлокерамических корпусов в больших масштабах является производство световых излучающих диодов (LED), которые, как правило, устанавливаются на малогабаритном двухвыводном кристаллодержателе. Массовое производство LED происходит в широком перечне применений, среди которых можно выделить сотовую связь – в аппаратах сотовых телефонов LED используются в качестве вспышки фотокамеры и подсветки клавиш; автомобильную промышленность – внешние огни и освещение салона; комнатное освещение и т.д.

Значительную долю среди устройств, имеющих металлокерамические корпуса, составляют МЭМС, такие как акселерометры, гироскопы и т.д. Рост использования МЭМС в последнее время носил взрывной характер, в том числе за счет их массового применения в гаджетах и автомобильной технике, сделав это направление значимым для индустрии корпусов.

Заметную роль в потреблении металлокерамических корпусов также играют матрицы видеорегистраторов на основе КМОП-элементов и ПЗС. Данные устройства, как и МЭМС, обычно устанавливаются в корпус типа CLCC.

¹ Компания "Евроинтех", sov@eurointech.ru

МАТЕРИАЛЫ

Керамические материалы обладают преимуществами, определяющими их широкую востребованность в электронной промышленности. Температурный коэффициент расширения (ТКР), близкий к кремнию, обеспечивает для них высокую надежность соединения между кристаллом и корпусом. Керамика хорошо подходит для работы устройства на ее основе в жестких условиях эксплуатации, где иные материалы не могут применяться вследствие своей низкой стойкости к термическим и механическим нагрузкам. Другим очевидным плюсом использования керамики является простота формирования внутри нее многослойной металлизации, что открывает широкие возможности при создании электронных устройств.

Высокотемпературная керамика (High-Temperature Co-fired Ceramic, сокращенно НТСС) имеет металлизацию на основе тугоплавких материалов – вольфрама, молибдена. Удельное электрическое сопротивление проводников для них составляет $15 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $12 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ соответственно. Для типичного современного НТСС-материала ВА-914 (разработка компании НТК) ТКР составляет $7,6 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ (для 800°C), диэлектрическая постоянная равна значению 9,2 (для 3 ГГц). НТСС характеризуется относительно высокой теплопроводностью и хорошо сочетается с металлическими частями, что дает возможность обеспечить изделиям на ее основе эффективный теплоотвод. Немаловажным преимуществом НТСС являются также хорошие прочностные характеристики.

Низкотемпературная керамика (Low-Temperature Co-fired Ceramic, сокращенно LTCC) отличается превосходными токопроводящими характеристиками за счет использования в качестве проводящих материалов серебра и меди, характеризующихся низким электрическим сопротивлением. Типичное значение удельного электрического сопротивления проводников для LTCC составляет $3 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, что почти на порядок меньше, чем у НТСС. Для современного материала GM-1 (разработка НТК) ТКР составляет не более $4,6 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ в диапазоне рабочих температур, диэлектрическая постоянная при 3 ГГц равна значению 6,37. В то же время LTCC проигрывает НТСС по прочности: для современных LTCC-материалов прочность на изгиб примерно равна 250 МПа. Важным параметром при работе с высокими частотами является коэффициент потерь при передаче сигнала; в этом отношении предпочтение следует отдать LTCC на основе меди, для которой характерны более низкие потери при передаче по сравнению как с LTCC на основе серебра, так и с НТСС (рис.1).

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

Металлокерамические корпуса обладают многоуровневой трехмерной структурой, разделяющей посадочные места для кристаллов, контактные площадки проволочных соединений, внешние выводы и посадочное место крышки. Для создания этой структуры используется совместный отжиг листов сырой керамики со слоями металлизации, наносимыми, как правило, с примене-

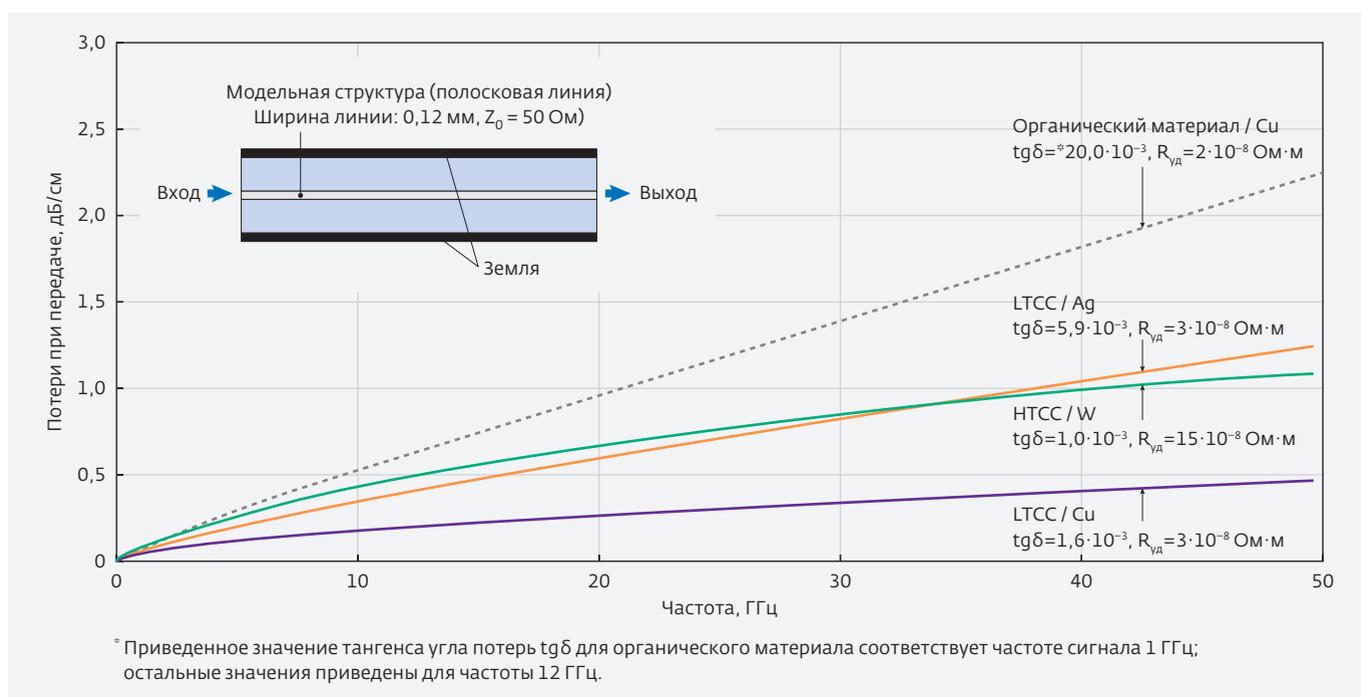


Рис.1. Частотная зависимость потерь при передаче сигнала для различных материалов

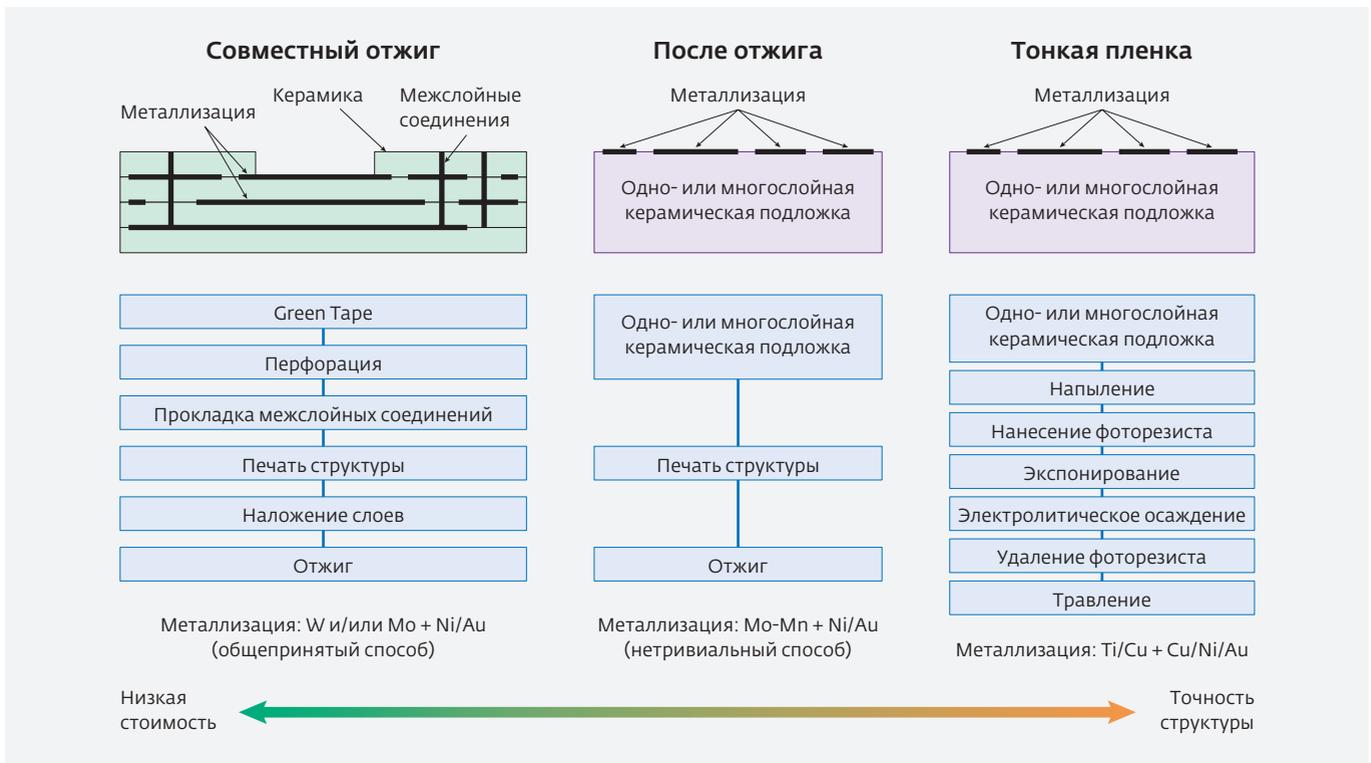


Рис.2. Технологии формирования проводниковых соединений

нием технологии трафаретной либо струйной печати. В общем виде последовательность технологических операций составляют (рис.2): заготовка листов из ленты сырой керамики (Green tape), изготовление межслойных отверстий методом механической либо лазерной перфорации, заполнение межслойных отверстий проводящим материалом, печать проводящей структуры на отдельных листах, их совмещение друг с другом и совместный отжиг (спекание).

Металлизацию также возможно наносить на сформированную керамическую подложку, прошедшую предварительный отжиг. В этом случае обычно происходящая при отжиге усадка керамики уже не вносит значительных геометрических искажений в структуру, что повышает точность ее формирования. Наилучших результатов удастся достичь с использованием тонкопленочных технологий. Типовая последовательность нанесения металлизации в этом случае будет следующая: вакуумное напыление тонкой металлической пленки (PVD-процесс), фотолитографические процессы (нанесение, экспонирование и проявление), электролитическое осаждение через маску фоторезиста, его удаление и травление, при котором металлизация снимается с участков поверхности, закрытых фоторезистом.

Помимо внутренней токопроводящей структуры, формируемой вышеуказанными методами, металлокерамические корпуса содержат внешние металлические

выводы. Материалом для изготовления выводов обычно служат медь, отличающаяся высокой токо- и теплопроводностью, либо никелевые сплавы, ТКР которых близок к значению для керамики. Последние также используются в качестве материала для сварочного кольца при шовно-роликовой герметизации. Для создания паяных соединений используется сплавы серебра и меди. Характеристики материалов, используемых во внешних токопроводящих частях корпусов, приведены в табл. 1.

В качестве примера использования серебряно-медного припоя можно привести установку штырьковых выводов, изготовленных из ковара, на контактные пло-

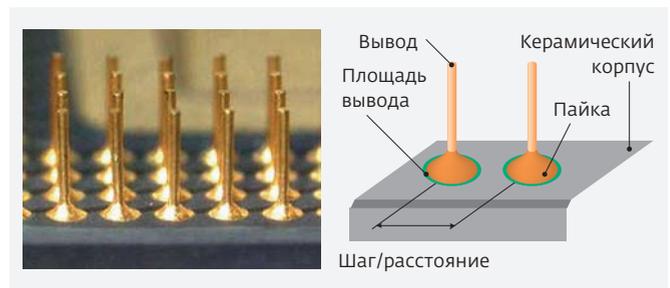


Рис.3. Штырьковые соединения на нижней стороне корпуса типа Micro-Pin

щадки с нижней стороны корпуса Micro-Pin (шаг между выводами: 1/1,27 мм; рис.3).

Внешние токопроводящие элементы металлокерамических корпусов покрываются тонким слоем никеля либо золота. Основными методами нанесения в обоих случаях будут являться электролитическое осаждение и химическое восстановление. Типичная толщина покрытия составляет от 1,5 до 9 мкм для Ni и от 1,3 до 6 мкм для Au. Электролитический способ является более универсальным, в то время как химическое восстановление подходит не для всех случаев. Например, этот метод не подходит при монтаже кристаллов на эвтектику Au-Si или герметизации корпуса эвтектическим сплавом Au-Sn. В тех случаях, когда нужно получить золотое покрытие от 1 мкм и менее, используется вакуумное испарение (PVD-процесс).

Толщина покрытия является легко варьируемым параметром, не требующим серьезной перенастройки оборудования. Таким образом, покрытие может быть адаптировано к конкретным требованиям по монтажу. Основными критериями, определяющими технологию нанесения покрытий, являются следующие: метод монтажа кристалла и температурный режим, который при этом используется, толщина и материал проволочных соединений, метод герметизации и его температурный

режим, а также максимальная температура процессов при изготовлении изделия и способ монтажа самого изделия (SMT либо Socket). В случае получения соответствующей информации от заказчика производитель может наилучшим образом подобрать способ нанесения и толщину металлического покрытия корпусов.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ

Современное производство металлокерамических корпусов невозможно представить без программных средств разработки (САПР), применение которых позволяет с высокой точностью предсказать поведение изделия при внесении тех или иных изменений в конструкцию корпуса.

Почти все ведущие производители САПР предлагают средства проектирования корпусов с различным уровнем интеграции в них средств моделирования паразитных эффектов, связанных в основном, с работой на высоких частотах. Ряд программных продуктов использует упрощенные средства моделирования на базе SPICE-алгоритмов, которые оперируют экстрагированными эквивалентными моделями критических элементов. Такие продукты имеют высокую скорость моделирования, но их точность снижается с ростом рабочей частоты исследуемого изделия. Максимальную

Таблица 1. Характеристики материалов, используемых во внешних металлических частях корпусов

	72% Ag-Cu	85% Ag-Cu	42 сплав	Ковар	Cu
Состав, %	Ag 72 Cu 28	Ag 85 Cu 15	Fe 58 Ni 42	Fe 54 Ni 29 Co 17	Cu 99,96
Применение	Пайка	Пайка	<ul style="list-style-type: none"> • Рамки с выводами; • уплотнительное кольцо; • контакт ввода-вывода 	<ul style="list-style-type: none"> • Рамки с выводами; • уплотнительное кольцо; • контакт ввода-вывода 	Контакт ввода-вывода
Теплопроводность при 25 °С, Вт/м·К	312	301	13	17	392
Коэффициент теплового расширения, $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	15,6	19,1	4,6	4,9	18,3
Модуль Юнга, ГПа	90	93	147	137	117
Прочность на изгиб, МПа	686	735-833	392-588	490-617	206
Температура плавления, °С	780	840	1427	1450	1083

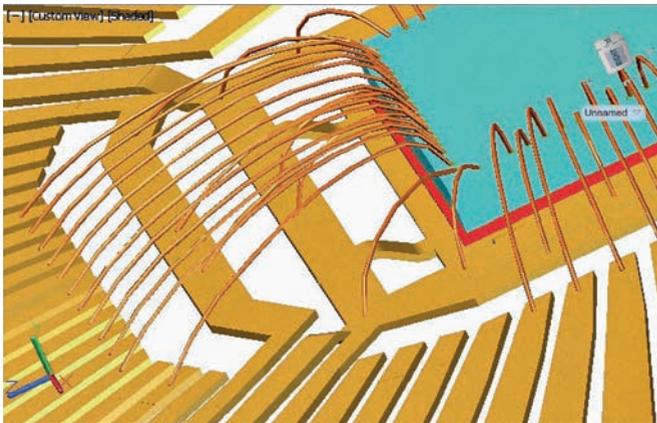


Рис.4. Компьютерная 3D-модель разварки перемычек

точность демонстрируют продукты, выполняющие полное трехмерное электродинамическое моделирование, однако они больше сфокусированы на анализе, нежели на проектировании.

Примером удачной комбинации скорости и точности вычислений можно назвать специализированный пакет Master Lead Frame Designer Suite из семейства программных средств для разработки керамических печатных плат компании CAD Design Software. Он предлагает полный цикл проектирования металлокерамического

корпуса, включая оптимизацию карты разварки перемычек кристалла (рис.4) и генерацию управляющих файлов для монтажного оборудования. С другой стороны, он позволяет создать трехмерную модель устройства, которая может быть передана в любую систему трехмерного электромагнитного моделирования для уточнения частотных характеристик.

В соответствии с особенностями конструкции устройства или поставленной задачей можно использовать вычисление характеристик в частотной или временной зависимости, а также моделировать тепловые эффекты и связанные с ними механические деформации. Анализ термомеханических напряжений, возникающих в корпусах из-за различий в ТКР, необходим с точки зрения оценки надежности изделий. Уровень интеграции вычислительных модулей позволяет в итоге получать уточненные частотные характеристики с учетом тепловых и механических эффектов. Также имеется возможность моделирования распределения электромагнитного поля. Примером такого средства проектирования может служить программный пакет CST Studio Suite (рис.5).

Однако, какими бы ни были результаты моделирования, окончательный ответ о применимости нового дизайна дает тестирование прототипов. Примеры тестовых процессов и некоторые типовые значения их параметров приведены в табл.2. Однако перечень возможных

Таблица 2. Примеры тестовых процессов при производстве металлокерамических корпусов

Процесс	Условия	Критерии
Термическое циклирование	Температурный диапазон от -55 до 125 °С; 1 000 циклов (после герметизации)	Отсутствие трещин или других признаков, которые указывают на возможную утечку
Тест на повышенную температуру и влажность	85 °С, 85%; 1 000 ч (после герметизации)	То же
Нагрев под давлением насыщенного водяного пара	120 °С; 2 атм.; 96 ч (после герметизации)	То же
Отжиг	350 °С, 1 мин	Отсутствие отшелушивания
Тест для определения усилия сдвига	Сдвиг шариковых выводов	Отсутствие смещения
Тест для определения усилия на отрыв	Механическая прочность проводочных соединений	Отсутствие обрыва проволоки и отслоения контактной площадки
Тест на смачиваемость припоем	PbSn припой; 215 °С; 5 с	Более 95% поверхности площадки должны быть покрыты без пробелов
	Бессвинцовый припой; 245 °С; 5 с	
Скотч-тест (тест на адгезию)	3M STD скотч	Отсутствие отшелушивания

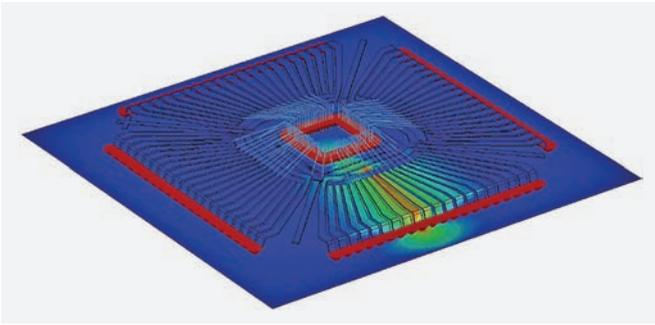


Рис.5. Пример моделирования распределения электромагнитного поля в корпусе

испытаний этим отнюдь не ограничивается. В отдельных случаях, для наиболее критичных по своей надежности изделий, число тестовых процессов измеряется десятками.

Сочетание положительных результатов компьютерного моделирования с подтверждением их в ходе измерения электрических характеристик прототипа и оценки его механических свойств дает основание для утверждения новой разработки в качестве серийного изделия.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ АКТУАЛЬНЫХ РАЗРАБОТОК

Характерной тенденцией в разработках металлокерамических корпусов является дальнейшая миниатюризация, что обусловлено требованиями к их использованию в составе компактных устройств, например, в сотовых телефонах. В настоящее время габариты миниатюрных корпусов у ПАВ-фильтров приближаются к 1 мм. В табл. 3 приведены минимальные значения ключевых параметров металлокерамических корпусов, которые доступны сегодня для серийного производства.

Столь впечатляющие результаты не были бы возможны без замены технологических процессов на более совершенные. Так, например, заметна тенденция к переходу на лазерные технологии; это касается и замены механической перфорации на лазерную при создании переходных отверстий, и разделения заготовки на отдельные корпуса. Нанесения надреза на матрицу заготовки механическим способом – с помощью лезвия – вызывает в ее материале деформацию смещения, в то время как лазерное скрайбирование свободно от этого недостатка и, кроме того, обеспечивает более высокую точность.

Важным направлением усилий разработчиков металлокерамических корпусов на основе НТСС является повышение их эксплуатационной надежности в первую очередь за счет увеличенной прочности. Не так давно компанией NTK было заявлено начало коммерческого применения материала BA-920 с прочностью на изгиб

Таблица 3. Минимальные значения конструктивных элементов металлокерамических корпусов, которые могут изготавливаться современным серийным производством

Параметр	Достижимое значение*
Толщина листа	<1,25 мм
Характерный размер элементов структуры и расстояние между ними	<40 мкм / 40 мкм
Диаметр переходного отверстия	<50 мкм
Шаг между переходными отверстиями	<140 мкм

* Согласно сведениям, заявленным NTK.

650 МПа, а в перспективе ожидается появление керамики с прочностью свыше 750 МПа.

Приоритетным направлением в разработках новых LTCC-материалов является достижение ТКР, приближенного по своему значению к кремнию, что позволяет снизить механические напряжения в области монтажа кристаллов до минимального уровня для широкого диапазона температур. Одновременно с этим современные материалы LTCC характеризуются незначительной усадкой при отжиге, что положительно сказывается на точности формирования структуры. Для недавно разработанного компанией NTK материала GM-1 разброс при измерении линейных размеров по партии керамических подложек, полученных после их отжига, составил всего $\pm 0,1\%$, что позволяет существенно уменьшить допустимые отклонения при производстве корпусов.

Резюмируя вышесказанное, мы видим, что возможности дальнейшего совершенствования технологии производства металлокерамических корпусов далеко не исчерпаны: ведущие производители уделяют большое внимание разработке новых типов керамики и внедрению новых технологических процессов. Среди наиболее важных вопросов при этом мы видим сочетаемость различных материалов друг с другом при совместном отжиге и других высокотемпературных процессах. Программное обеспечение, задействованное в разработке конструктива корпусов, также продолжает совершенствоваться.

ИСТОЧНИКИ:

- <http://www.ngkntk.co.jp/english/>
- https://www.cst.com/Content/Articles/article1014/CST-Application-Note_Lead-Frame-Package-Layout-EM-Simulation.pdf