

## ТЕХПОДДЕРЖКА

# Деформация LTCC-изделий в процессе обжига



Текст: Роман Кондратюк



С деформацией LTCC-изделий в процессе обжига так или иначе сталкиваются все производители. Эта проблема приобретает особое значение при запуске в производство новых изделий. В данной статье проведена классификация основных факторов, влияющих на изгиб LTCC-плат во время обжига; рассмотрены пути решения проблемы деформации с точки зрения выбора материалов, конструкции изделия, а также параметров технологического процесса.

## Введение

Одной из наиболее часто встречаемых проблем при запуске в производство нового LTCC-изделия является деформация платы в процессе обжига. В связи с этим разработчики и технологи вынуждены искать, устранять причины и фиксировать допустимые значения изгиба для своего технологического процесса.

Деформация LTCC-плат во время обжига — это многофакторная и не всегда однозначно решаемая задача, поскольку многослойная низкотемпературная совместно спекаемая керамика представляет собой чередующиеся разнородные слои стекла, керамики, металлов с различными свойствами и поведением во время обжига. Особенности оборудования и технологического процесса также могут вносить неопределённость в данный вопрос.

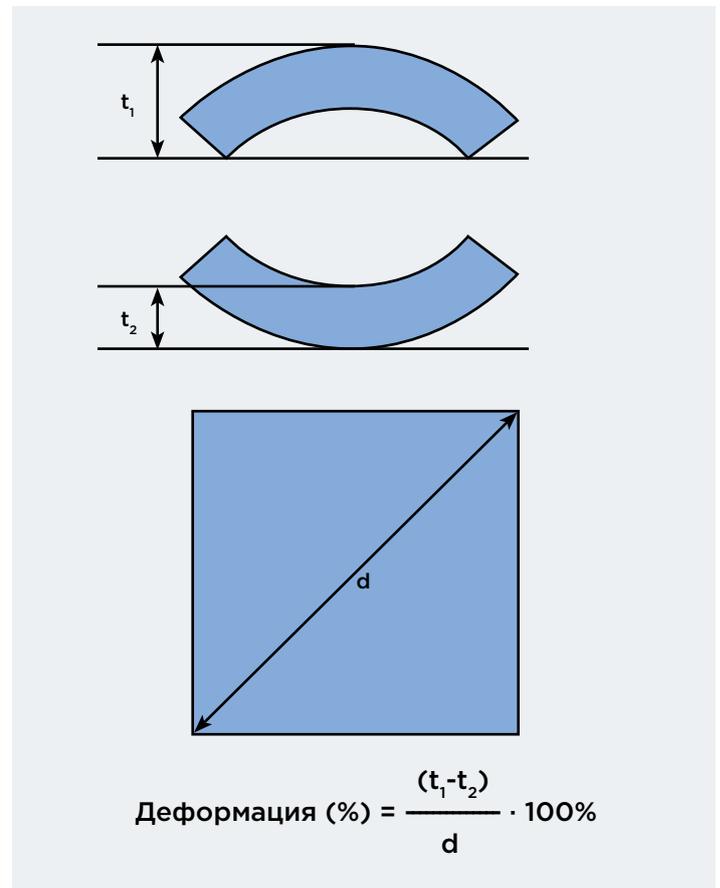
В связи с этим у технологов и разработчиков возникает необходимость классификации причин деформации LTCC-изделий во время обжига и изучения путей и методов её снижения.

## Допуски на изгиб LTCC изделий

Компании, производящие LTCC-изделия, как правило, устанавливают допуски на изгиб многослойных плат в соответствии с возможностями своего производства и требованиями конечного потребителя изделий.

Методика измерения деформации и типовые значения допусков на изгиб для некоторых мировых производителей приведены на рис 1 и в Т 1. Из таблицы видно, что допуски на изгиб варьируются от 10 до 100 мкм на 1 см длины LTCC-платы в зависимости от типа тестовой структуры и от условий измерения. Указанные значения получают опытным путём. Они выступают индикатором технологических возможностей каждого конкретного производителя. На основании этих данных выпускаются рекомендации по проектированию с целью снижения деформации для заказных изделий.

Следует отметить, что значения неплоскостности для многослойных LTCC-плат отличаются в худшую сторону от соответствующих значений для однослойных керамических плат, используемых для тонкоплёночной технологии. Это вызвано тем, что однослойные платы не испытывают воздействия разнородных материалов во время обжига и в ряде случаев подвергаются дополнительной полировке. Поэтому переход от керамических изделий, изготовленных по тонкоплёночной технологии, к LTCC-платам может потребовать изменения технологического маршрута изготовления конечного изделия.



1  
Метод определения деформации LTCC-платы

## Причина деформаций LTCC-изделий

В основе эффекта деформации LTCC-платы во время обжига лежит эффект, схожий с поведением биметаллической пластины рис 2. Два разнородных металла, жёстко соединённых друг с другом (пайкой, сваркой или разъёмным соединением), при изменении температуры расширяются или сжимаются в соответствии со своими температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР):

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (1),$$

где  $\Delta L$  — изменение длины,  $L_0$  — начальная длина,  $\alpha$  — ТКЛР,  $\Delta T$  — разность температур.

Это приводит к изгибу всей биметаллической пластины в сторону металла с большим ТКЛР (нагрев) или с меньшим ТКЛР (охлаждение) рис 2.

Т 1

Допуски на неплоскостность основных мировых производителей LTCC-изделий

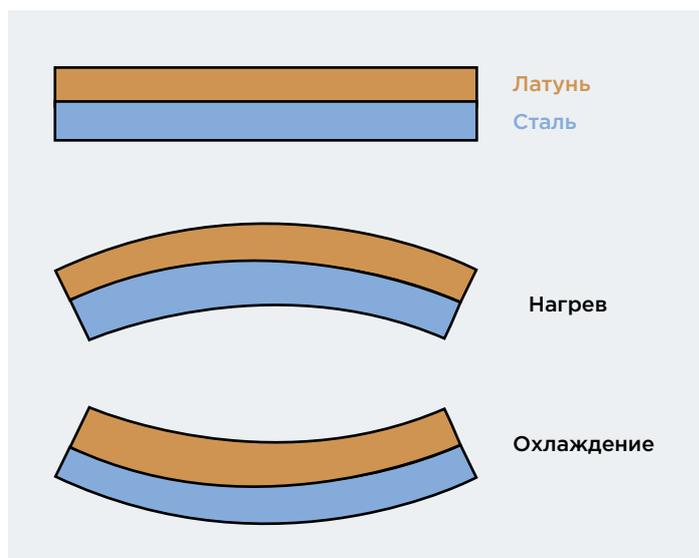
Компания	Неплоскостность		Условия измерения
	(исходные данные)	(в %)	
Anaren Ceramics	< 3 мкм/см	< 0,03	8 слоёв без металлизации
ATC	< 2 мкм/мм	< 0,2	-
DuPont	< 3 мил/дюйм	< 0,3	-
Ferro	< 3 мил/дюйм	< 0,3	-
Heraeus	< 1 мил/дюйм	< 0,1	Образец 2»x2» со сбалансированной металлизацией
Hirai	±0,3 %	± 0,3	
Kyocera	< 0,004 дюйм/дюйм	< 0,4	-
Murata	±5 мкм/4мм	< 0,13	Образец 4x4мм с металлизацией
Natel			Повторяет подложку
Pilkor	±0,4 %	± 0,4	-
Sea Ceramic Technologies	< 2 мил/дюйм/дюйм	< 0,2	-
SEI (C-MAC)			Повторяет подложку
Via Electronic	0,005-0,08 мм /10 мм	0,05 – 0,8	Образец 10x10 мм

Однако ТКЛР является не единственным параметром, определяющим изгиб биметаллической пластины. Деформация также зависит от толщины и модуля упругости слоёв<sup>1</sup>. Если, например, один из разнородных металлов напылён тонким слоем на другой металл или двуслойная пластина состоит из слоёв эластомера и твёрдого металла, то вероятность возникновения биметаллического эффекта стремится к нулю, поскольку сжатие/расширение будет в значительной степени определяться наиболее толстым и твёрдым слоем металла.

В случае с обжигом многослойных LTCC-изделий наблюдается схожая ситуация, поскольку здесь вместе соединяются чередующиеся разнородные слои керамики, стёкол и металлов.

Деформация при обжиге многослойной керамики обусловлена различием коэффициентов сжатия и расширения слоёв. Однако при рассмотрении этого процесса основное значение приобретают коэффициенты усадки слоёв во время обжига, а не ТКЛР, как в случае биметаллической пластины. В процессе обжига происходит размягчение слоёв керамики, металлизации, переход в твердое состояние и их спекание, которое приводит к уплотнению и сжатию слоёв.

Процесс деформации многослойных плат во время обжига описан математически<sup>2</sup>. Величина изгиба LTCC-плат зависит от толщин слоёв, упругих свойств материалов в твёрдом состоянии, вязкостей в размягчённом состоянии, а также от коэффициентов усадки слоёв в процессе обжига.



2 Биметаллическая пластина

Считается, что основное влияние на деформацию многослойных плат оказывает различие коэффициентов усадки керамики и металлизации. Однако в некоторых случаях может наблюдаться изгиб при обжиге многослойных керамических плат и без металлизации рис 3. Такой эффект может быть обусловлен различием коэффициентов усадки отдельных областей платы вследствие неравномерного прогрева, различной плотности и состава керамики, прилипания керамики к подложке или избыточного потока воздуха, который деформирует керамику в размягчённом состоянии.

1 T. Clyne, «Residual stresses in surface coatings and their effects on interfacial debonding,» Key Engineering Materials (Switzerland), pp. Vol. 116–117, pp. 307–330., 1996.

2 J.-H. J. a. C.-R. Chang, «Camber development during cofiring Ag-based Low-dielectric-constant ceramic package,» . Mater. Res., pp. Vol. 12, No. 1, Oct 1997.



3 Пример деформации LTCC-платы после обжига. Металлизация отсутствует

При обжиге плат с металлизацией ко всем перечисленным факторам добавляется также различие в усадке керамики и металлических слоёв. Совместимость материалов в таких изделиях выходит на первый план.

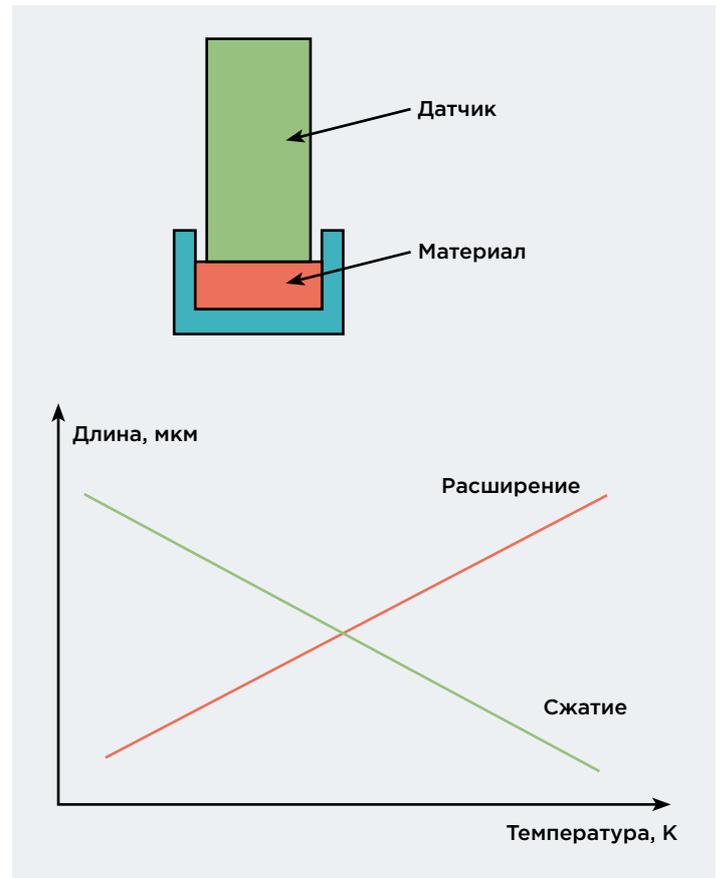
## Совместимость LTCC-материалов

Основной методикой для проверки совместимости LTCC-материалов является термомеханический анализ (ТМА). Суть метода заключается в измерении геометрических размеров отдельных материалов при их нагревании/охлаждении рис 4.

На рис 5 показаны результаты ТМА анализа для LTCC-системы Ferro А6М-Е. По оси X отложено время нагрева (минуты), по оси Y1 — изменение линейных размеров образца материала (%), по оси Y2 — температура (°C). На графике показаны профиль изменения температуры (прямая линия, ~ 8,1 °C/мин), а также изменение размеров образцов LTCC-керамики (график 1 на рис 5) и металлизационных паст (графики 2 – 5 на рис 5).

Анализ данных ТМА показывает, что при нагревании все LTCC-материалы в определённый момент начинают сжиматься, затем выходят на фиксированный размер или расширяются. Такое поведение объясняется составом веществ и физико-химическими процессами, протекающими в материалах во время обжига.

LTCC-керамика состоит из смеси порошков низкотемпературных стёкол и керамики. При нагревании происходит расплавление стекла, растворение в нём



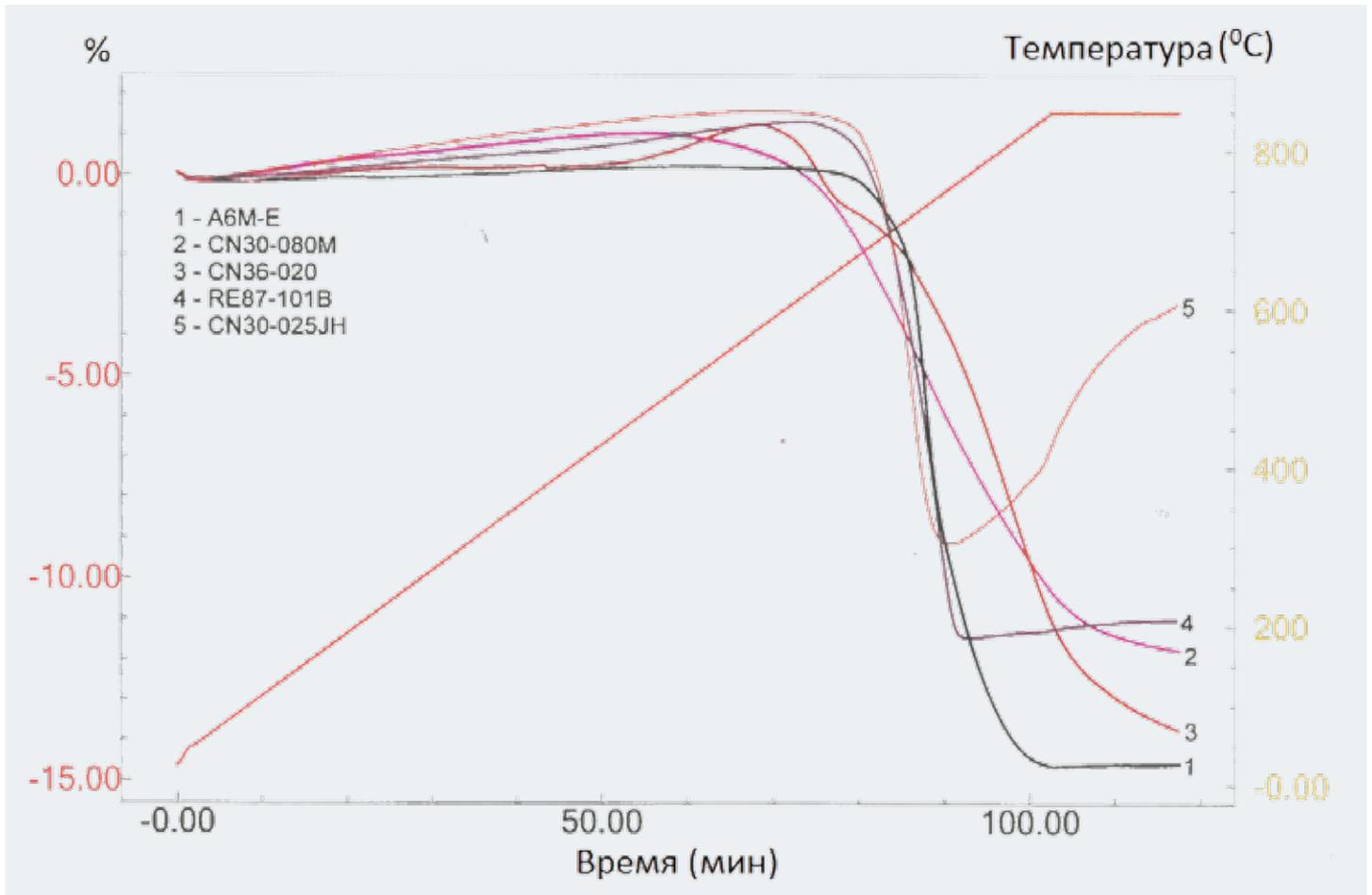
4 Суть термомеханического анализа

керамического наполнителя, изменение состава и фазовое превращение материалов. В связи с этим наблюдается уменьшение объёма вещества, и, как следствие, увеличение его плотности (график 1 на рис 5).

Металлизационные пасты состоят из смеси порошков стекла и металла (Ag, Au, Pt, Pd) иногда с добавлением керамики<sup>3</sup>. Поведение данного материала схоже с LTCC-керамикой, но при определённой температуре усадка сменяется расширением (графики 2 – 5 на рис 5). Это объясняется спеканием металлических частиц в твёрдую матрицу и последующим её расширением при нагревании в соответствии со своим ТКЛР.

Производители LTCC-систем стараются получить схожие графики ТМА для керамики и металлизационных паст рис 5. Это снижает вероятность возникновения деформаций многослойных изделий во время обжига.

Следует отметить, что ТМА проводится для изолированных образцов материалов, и их поведение может существенным образом отличаться в многослойной структуре, когда на каждый слой воздействуют другие.



5

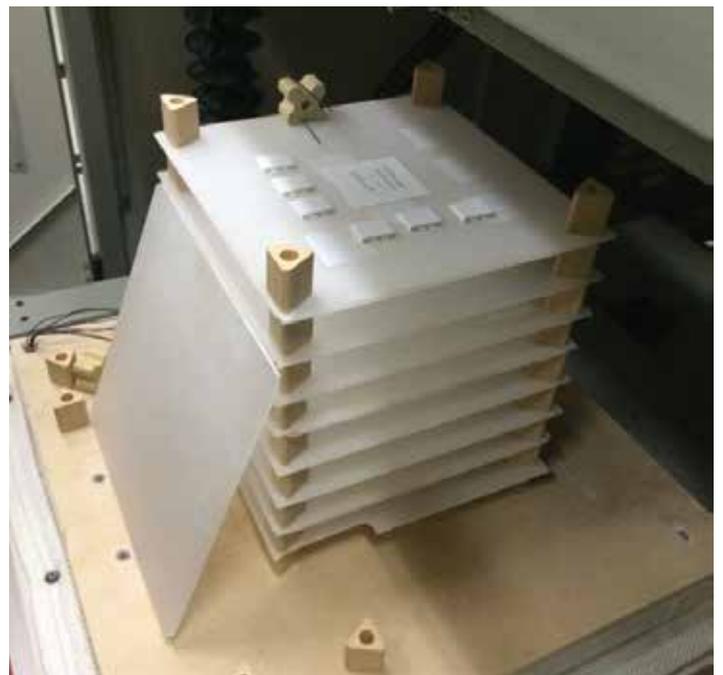
Данные термомеханического анализа для LTCC-керамики Ferro A6M-E

На практике полного совпадения графиков усадки получить не удаётся в силу различий в природе веществ. Однако результаты ТМА не являются единственным фактором, определяющим величину деформации многослойных плат, и образцы с высокой плоскостностью могут быть получены даже при существенном расхождении в коэффициентах усадки.

В многослойной конфигурации на изгиб во время обжига могут также влиять механические свойства паст/керамики (вязкость, твёрдость, пластичность и проч.) и величина адгезии паст к керамическим слоям<sup>4</sup>. Кроме того, важную роль в деформации играет толщина керамических листов и металлизации. Изгиб во время обжига зависит от толщины слоёв как:

$$k \sim \frac{6d}{D^2} \quad (2)$$

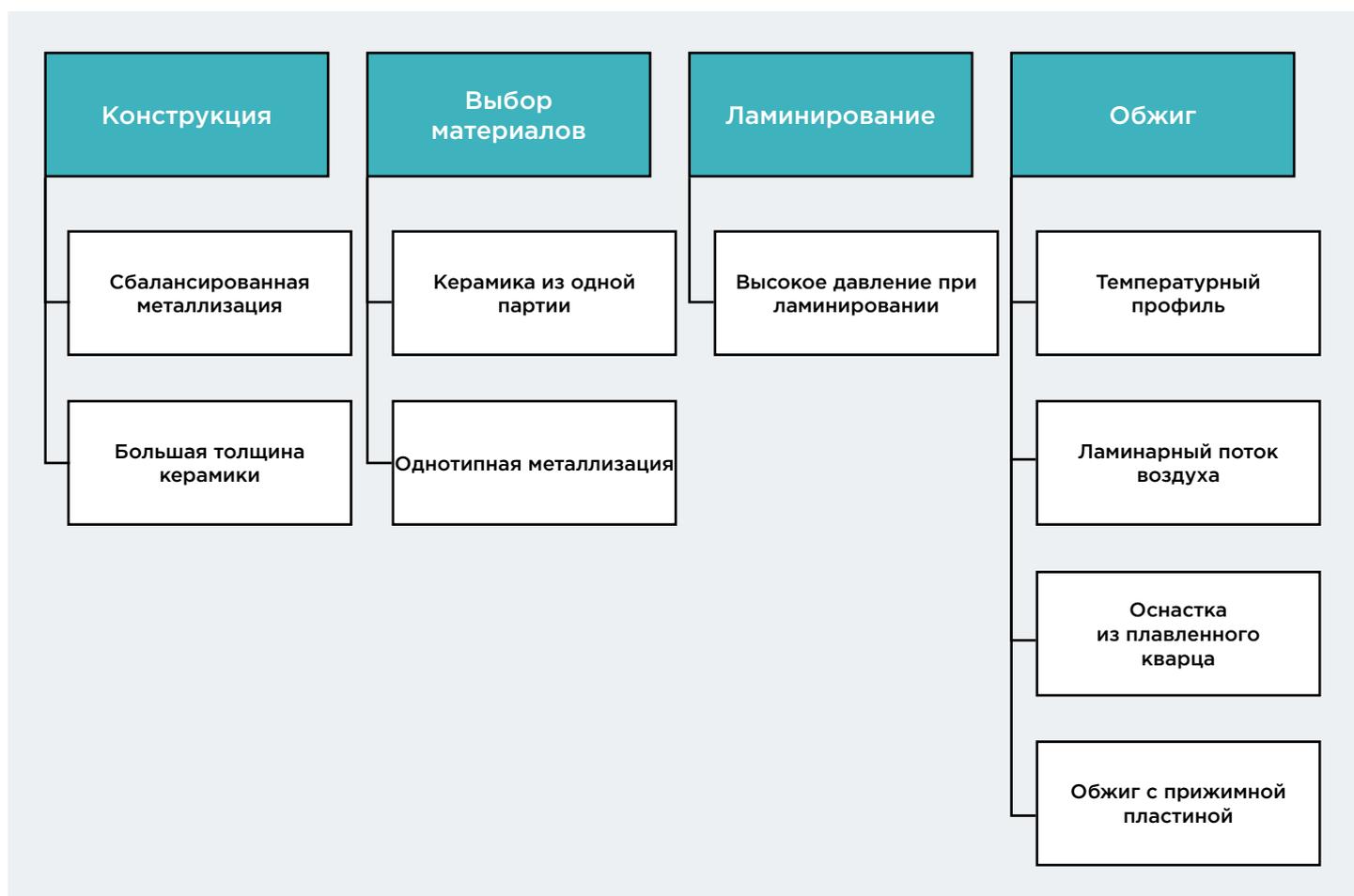
где  $k$  — изгиб пластины,  $d$  — толщина металлизации,  $D$  — толщина керамики.



6

Оснастка из плавящего кварца для обжига LTCC-керамики

<sup>4</sup> G. L. M. a. D. J. G. Sang-Ho Lee, "Warpage Evolution of Screen Printed Multilayer Ceramics During Co-firing," Key Engineering Materials, pp. Vols. 264-268 (2004) pp. 321-328.



7 Основные факторы, определяющие деформацию LTCC-изделий после обжига

Поэтому при фиксированном комплекте LTCC-материалов основным фактором, определяющим деформацию, является толщина керамики — чем она больше, тем меньше изгиб.

Таким образом, деформация многослойных плат во время обжига зависит от совместимости материалов, их физических свойств и толщины слоёв металлизации и LTCC-керамики.

## Устранение деформаций

Изгиб многослойных плат во время обжига определяется силами сжатия/расширения, возникающими между разнородными слоями материалов. Величина этих сил зависит от многих факторов, таких как усадка материалов, их физические свойства, толщина слоёв, параметры техпроцесса. В связи с этим усилия по снижению деформации могут быть направлены на оптимизацию конструкции LTCC-изделия, выбор схожих материалов и отладку технологического процесса **рис 7**.

С точки зрения конструкции LTCC-изделия следует проектировать металлизацию, сбалансированную относительно центра платы (горизонтальная плоскость). Это

позволяет снижать изгиб платы за счёт равномерной усадки слоёв металлизации во время обжига.

Также при разработке конструкции изделия важно учитывать соотношение толщин металлизации и керамики (формула 2). Для снижения изгиба плат при обжиге рекомендуется увеличивать толщину керамики.

При выборе LTCC-материалов необходимо обращать внимание на их исходные свойства, такие как совместимость коэффициентов усадки (ТМА) и однотипность металлизации (использование Au с Au или Ag с Ag металлизацией). Также рекомендуется в одном изделии использовать керамику из одной партии, поскольку усадка может различаться от партии к партии. Высокая совместимость материалов позволяет снизить деформацию многослойной структуры во время обжига.

С технологической точки зрения важнейшими этапами, определяющими деформацию, являются ламинирование и обжиг. Эти две технологические операции в значительной степени определяют коэффициенты усадки слоёв во время обжига.

Высокое давление при ламинировании снижает коэффициент усадки слоёв. В ряде случаев это помогает устранять или уменьшает деформацию плат во время обжига.

Обжиг керамики является одним из наиболее сложных и ответственных технологических процессов в производстве LTCC-изделий и определяет параметры и качество конечных изделий. С точки зрения деформации следует обращать внимание на температурный профиль, поток воздуха и используемую оснастку. Для образцов с толщиной более 1,5 мм следует устанавливать скорость нагрева  $\leq 1$  С/мин до этапа выжигания органики. Это позволяет равномерно прогревать и выводить из LTCC-платы летучие компоненты. Поток воздуха в печи должен быть ламинарным и обеспечивать равномерный прогрев всего изделия. Оснастку рекомендуется выбирать из плавящего кварца, с целью снижения вероятности прилипания LTCC-изделия во время обжига 

В ряде случаев для обеспечения высокой плоскостности изделий во время обжига используется прижим-

ная пластина из пористого материала. Масса пластины выбирается достаточной для компенсации изгибающих сил, но в то же время не слишком большой, чтобы не влиять на усадку LTCC-изделия в горизонтальном направлении. Наличие пор или отверстий в пластине необходимо для вывода органических летучих компонентов из LTCC-материалов во время обжига. Наиболее часто применяемыми решениями здесь являются пористые прижимные пластины из оксида алюминия или оксида циркония.

Таким образом, устранение деформаций LTCC-изделий может быть направлено в сторону оптимизации конструкции, выбора согласованных материалов, подбора параметров ламинирования и обжига, а также использования прижимной пластины во время спекания.

---

**Деформация в процессе обжига является важной и не всегда однозначно решаемой задачей в производстве LTCC-изделий.**

**В основе деформации многослойных плат лежит эффект, схожий с эффектом биметаллической пластины, когда при нагревании/охлаждении наблюдается различное сжатие или расширение слоёв. При обжиге LTCC-изделий основной вклад в деформацию вносит усадка слоёв за счёт уплотнения структуры, изменения состава и фазовых превращений, входящих в систему материалов.**

**LTCC-система — это прежде всего согласованные по коэффициентам усадки керамика и металлизация. Для подбора коэффициентов усадки производители LTCC-материалов используют термомеханический анализ. Схожие ТМА-графики позволяют говорить о совместимости разнородных слоёв с точки зрения деформации.**

**Снижению проблем с деформацией во время обжига способствуют сбалансированная относительно центра платы металлизация, увеличение толщины керамики, отладка процессов обжига и ламинирования, а также использование прижимной пластины во время обжига.**

**В целом устранение проблем с деформацией LTCC-изделий требует практических навыков и не всегда решается однозначно. Специалисты Группы компаний Остек, используя значительный опыт компании Ferro в области разработки и применения LTCC-материалов, готовы оказать всестороннюю техническую и технологическую поддержку в решении проблем, возникающих при производстве LTCC-изделий. **