

# Подложки печатных плат: как выбрать правильный диэлектрический материал

Если вы проектируете печатные платы для аэрокосмической или автомобильной промышленности, то знаете: такие платы должны обладать хорошей механической прочностью и химической стабильностью, чтобы выдерживать высокие температуры, влажность и нагрузки, неизбежные при эксплуатации электронного устройства в суровых условиях окружающей среды. Разработчику необходимо иметь глубокое понимание свойств и характеристик используемых материалов, в особенности — диэлектриков, для того чтобы создавать эффективные и надежные печатные платы.

Перевод:  
Сергей Шихов

sergey@acon.ru

В статье рассматриваются электрические, механические, термические и химические свойства подложек печатных плат. Приведенная информация поможет инженерам выбрать правильный материал и создавать технологичные электронные изделия.

## Тепловые свойства подложек печатных плат

Подложка печатной платы представляет собой слой диэлектрика, который работает как изолятор между двумя слоями меди в стеке печатной платы (рис. 1). Благодаря своим свойствам он оказывает воздействие на эффекты затухания сигнала, перекрестных помех и электромагнитного излучения, что напрямую влияет на целостность сигнала. Например, материал печатной платы с низким Dk, такой как Rogers 4350B, будет показывать потери меньше, чем стандартный FR4, даже на высоких частотах.

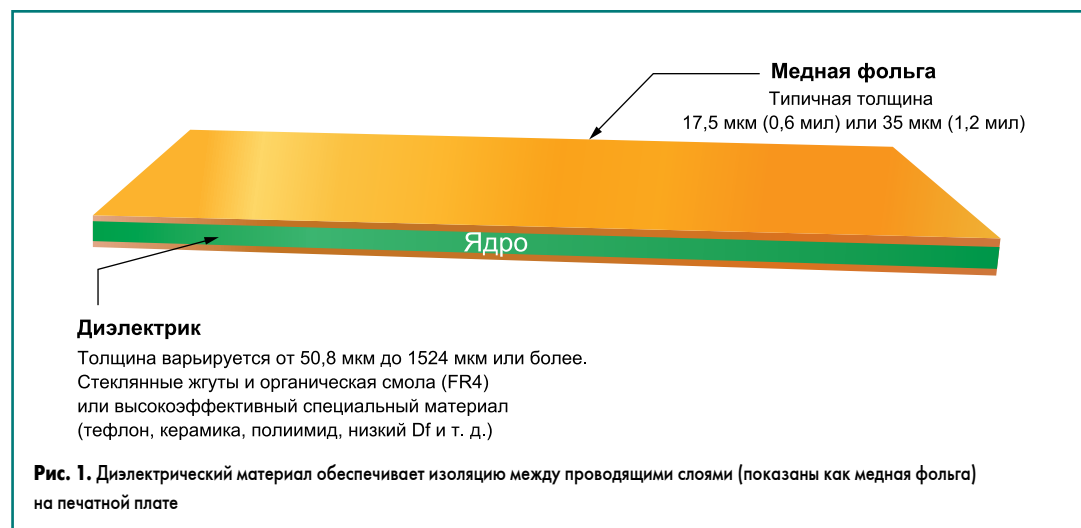
## Температура стеклования (Tg)

Температура стеклования (Glass transition), или Tg, — это температурный диапазон, в котором подложка печатной платы переходит из стекловидного, жесткого состояния в размягченное, деформируемое состояние вследствие того, что полимерные цепи становятся более подвижными. Когда материал остывает, его свойства возвращаются к исходному состоянию. Tg выражается в единицах градусов Цельсия (°C).

## Температура разложения (Td)

Температура разложения (Decomposition temperature), или Td, — это температура, при которой материал печатной платы химически разлагается. Физически этот момент оценивается как потеря материалом не менее 5% массы. Как и Tg, Td выражается в единицах градусов Цельсия (°C).

При сборке печатных плат Td подложки становится важным ограничением, поскольку изменения



его свойств при достижении и превышении температуры  $T_d$  необратимы. Сравните это с  $T_g$ , температурой стеклования, при которой свойства вернутся к исходному состоянию, как только материал остынет ниже диапазона  $T_g$ .

Следует выбирать материал, с которым можно работать в диапазоне температур, превышающих  $T_g$ , но значительно ниже  $T_d$ . Большинство рабочих температур во время сборки печатной платы варьируются в пределах  $+200 \dots +250^\circ\text{C}$ , поэтому нужно убедиться, что  $T_d$  материала, который вы планируете использовать, выше. К счастью, у многих материалов  $T_d$  больше  $+320^\circ\text{C}$ .

#### Коэффициент теплового расширения (КТР)

Коэффициент теплового расширения (Coefficient of thermal expansion — CTE), или КТР, — это мера расширения материала печатной платы при нагревании. КТР выражается в частях на миллион (parts per million — ppm), на которые материал расширяется при нагревании на каждый градус Цельсия.

По мере того как температура материала поднимается выше  $T_g$ , КТР также будет расти.

Также нужно помнить, что КТР подложки печатной платы обычно намного выше, чем у меди, что может вызвать проблемы с их соединением при нагревании печатной платы.

Расширение материала по разным осям различно. КТР по осям X и Y чаще низкие — около  $10\text{--}20 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ . В типовых материалах это свойство обеспечивается структурой стеклоткани, которая и ограничивает расширение материала в направлениях X и Y. КТР по этим осям не сильно меняется даже при повышении температуры материала выше  $T_g$ .

А вот по оси Z материал расширяется без ограничений (рис. 2), поэтому при его выборе надо помнить, что КТР по оси Z должен быть как можно ниже, то есть стремиться к значению менее  $70 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ , поскольку КТР будет

увеличиваться по мере приближения температуры материала к  $T_g$ .

Точка, в которой на кривой смещение КТР максимально, называется температурой стеклования ( $T_g$ ). Если температура выше  $T_g$ , подложка размягчается и больше не расширяется.

#### Теплопроводность (k)

Теплопроводность, или k, — это свойство материала проводить тепло. Низкая теплопроводность означает низкую теплопередачу, а высокая теплопроводность означает высокую теплопередачу. Мера скорости теплопередачи выражается в ваттах на метр на градус Цельсия ( $\text{Вт}/\text{М}\cdot^\circ\text{C}$ ).

Большинство подложек печатных плат имеют теплопроводность в диапазоне  $0,3\text{--}0,6 \text{ Вт}/\text{М}\cdot^\circ\text{C}$ , что довольно мало по сравнению с медью, k которой составляет  $386 \text{ Вт}/\text{М}\cdot^\circ\text{C}$ . Отсюда можно сделать простой вывод, что медные слои в составе платы будут переносить тепло быстрее и в большем количестве, чем диэлектрический материал подложки.

#### Электрические свойства подложек

##### Диэлектрическая проницаемость или относительная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon_r$ или Dk)

Учитывать диэлектрическую проницаемость (диэлектрическую константу) материала важно для сохранения целостности сигнала и из соображений импеданса — это базовые факторы среди высокочастотных электрических характеристик. Для большинства материалов печатных плат  $\epsilon_r$  находится в диапазоне  $2,5\text{--}4,5$ .

Диэлектрическая проницаемость изменяется в зависимости от частоты и, как правило, с увеличением частоты уменьшается. Некоторые материалы демонстрируют при этом меньшее изменение относительной ди-

электрической проницаемости, чем другие. Из этого можно сделать простой вывод: наиболее подходящие для высокочастотных применений подложки — те, диэлектрическая проницаемость которых остается относительно одинаковой в широком диапазоне частот, от нескольких сотен МГц до нескольких ГГц.

#### Материалы с низким Dk

Как известно, излучаемая электромагнитная волна не ограничивается дорожкой и проходит через подложку. Диэлектрическая проницаемость материала подложки изменяет поведение сигнала, что может вызвать нарушение его целостности. Этот эффект становится еще более заметным на высоких частотах.

Скорость распространяющейся электромагнитной волны обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости. А это значит, что материал печатной платы с низким Dk будет давать следующие преимущества:

- высокоскоростные сигналы распространяются с меньшими потерями;
- между близко расположенными дорожками и переходными отверстиями можно ожидать меньше перекрестных помех;
- потребность в емкостной связи в схеме также будет более ограниченной;
- неблагоприятные эффекты, которые возникают из-за несоответствия длин дорожек в параллельных сетях будут уменьшены.

При всех этих преимуществах потери в материале печатной платы с низким Dk все равно имеют место, поэтому сохраняется риск искажения цифровых сигналов. Кроме того, данные материалы ощутимо дороже, чем FR4. Для них могут потребоваться более высокие температуры и давление в процессе изготовления платы, что может еще больше повысить итоговую стоимость.

Для знакомства с примерами высокоскоростных материалов можно обратить внимание на Rogers 4350B, RT Duroid 5880 и Isola-I speed.

#### Материалы с высоким Dk

Несмотря на то что целостность питания ассоциируется с постоянством входного напряжения, диэлектрическая проницаемость также влияет на стабильность питания. Если поместить материал с высоким Dk между слоями питания и заземления, межплоскостная емкость станет значительной.

Сами слои действуют как большой развязывающий конденсатор, который помогает поддерживать постоянное входное напряжение. Он также снижает сопротивление PDN (power distribution networks — сеть распределения питания), то есть уменьшает импеданс. Однако более высокий Dk приведет к увеличению диэлектрических потерь и перекрестных помех, а также вызовет проблемы с электромагнитными помехами. Чтобы сбалансировать мощность и целостность сигнала, рекомендуется выбрать гибридный стек из материалов печатной платы с высоким и низким Dk.

Подложка с более высокой диэлектрической проницаемостью может использоваться для разделения слоев питания и заземления, а подложка с более низким Dk при этом будет

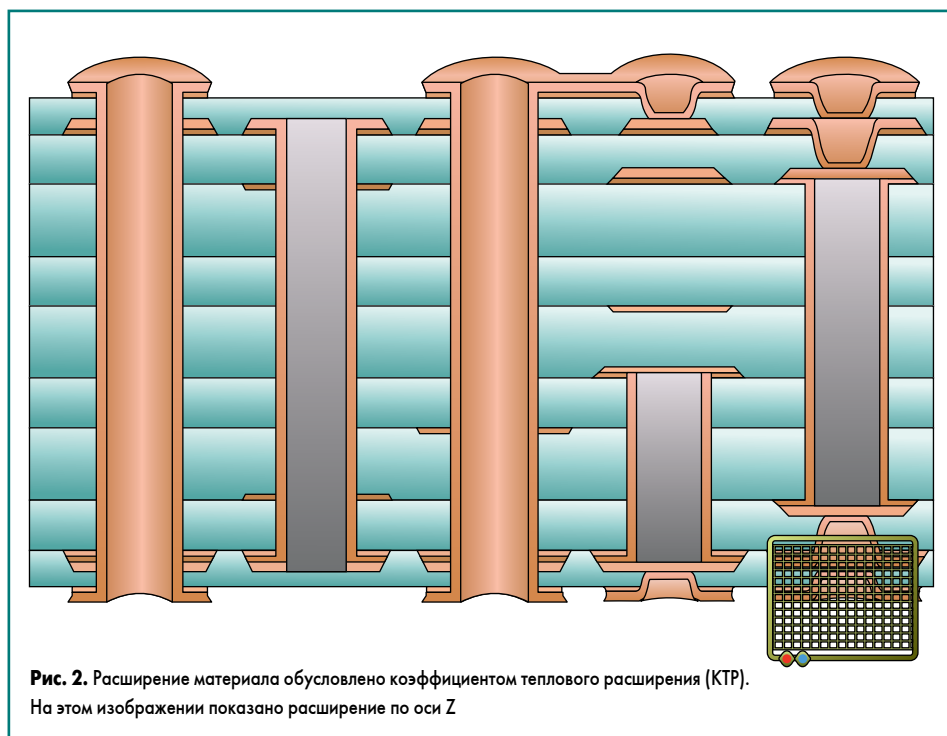


Рис. 2. Расширение материала обусловлено коэффициентом теплового расширения (КТР). На этом изображении показано расширение по оси Z

поддерживать сигнальный слой, обеспечивая меньшие потери. Эффективность гибридного стека зависит и от умений проектировщика, и от возможностей производителя. На каждом этапе изготовления такой платы следует учитывать разницу в КТР используемых материалов.

### Тангенс угла диэлектрических потерь или коэффициент рассеяния ( $\tan \delta$ или $Df$ )

Тангенс угла диэлектрических потерь (Dielectric loss tangent) материала позволяет оценить количество мощности, теряемой из-за свойств материала. Чем ниже тангенс угла диэлектрических потерь, тем меньше мощности теряется. У большинства материалов печатных плат  $\tan \delta$  колеблется от 0,02 для наиболее часто используемых материалов до 0,001 для высококачественных материалов с очень низкими потерями, он также меняется с частотой, увеличиваясь по мере повышения частоты.

Тангенс угла диэлектрических потерь в целом не является критическим фактором для цифровых схем, за исключением очень высоких частот (1 ГГц и выше). Однако это очень важный параметр для аналоговых сигналов, поскольку он определяет степень затухания сигнала и, как следствие, влияет на соотношение сигнал/шум в различных точках сигнальных дорожек.

На контролируемый импеданс и ширину проводника существенно влияет диэлектрическая проницаемость. Если  $Dk$  материала выше, то для достижения целевого импеданса потребуется меньшая ширина дорожки.

### Объемное сопротивление ( $\rho$ )

Объемное сопротивление, или электрическое сопротивление ( $\rho$ ), является одной из мер, описывающих электрическое или изоляционное сопротивление материала печатной платы. Чем выше сопротивление материала, тем менее охотно он допускает перемещение электрического заряда и наоборот. Сопротивление выражается в ом-метрах (Ом·м,  $\Omega \cdot m$ ) или ом-сантиметрах (Ом·см,  $\Omega \cdot cm$ ). Сопротивление в некоторой степени зависит от влажности и температуры.

Как диэлектрические изоляторы, подложки печатных плат должны иметь очень высокие значения сопротивления, порядка  $10^6$ – $10^{10}$  МОм·см.

### Поверхностное сопротивление ( $\rho_s$ )

Поверхностное сопротивление ( $\rho_s$ ) — мера электрического или изоляционного сопротивления поверхности подложки печатной платы. Как и в случае объемного сопротивления, материалы печатных плат должны иметь очень высокие значения поверхностного сопротивления, порядка  $10^6$ – $10^{10}$  МОм/кв. На поверхностное сопротивление также в некоторой степени влияют влажность и температура.

### Электрическая прочность

Электрическая (диэлектрическая) прочность характеризует способность подложки печатной платы противостоять электриче-

скому пробоем в направлении оси Z печатной платы (перпендикулярно плоскости ПП). Она выражается в вольтах на сантиметр или вольтах/мил в англоязычной литературе и спецификациях. Типичные значения электрической прочности для диэлектриков печатных плат находятся в диапазоне 30–60 кВ/мм.

Электрическая прочность определяется путем воздействия на материал печатной платы коротких импульсов высокого напряжения на стандартных частотах переменного тока. Короткие импульсы требуются для того, чтобы результаты измерений не искажались тепловым пробоем.

## Химические свойства материалов

### Характеристики воспламеняемости (UL94)

UL94, или «Стандарт безопасности воспламеняемости пластиковых материалов для деталей в испытаниях устройств и приборов» (“Standard for Safety of Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances testing”, UL enterprise, США), является стандартом воспламеняемости пластиков, который классифицирует пластики от самого низкого стандарта (наименее огнестойкие) до самого высокого (наиболее огнестойкие).

Стандарты определены Underwriters Laboratories (UL). Большинство подложек печатных плат соответствуют UL94 V-0:

1. Образцы не должны гореть открытым огнем более 10 с после любого применения испытательного пламени.
2. Общее время горения не должно превышать 50 с для 10 применений пламени для каждого набора из пяти образцов.
3. Образцы не должны сгорать открытым огнем или дотлевать до удерживающего зажима.
4. Образцы не должны капать горящими частицами, которые способны воспламенить сухую хирургическую вату, расположенную под испытуемым образцом на расстоянии 300 мм.
5. Образцы не должны показывать тлеющего горения, которое сохраняется более 30 с после второго удаления испытательного пламени.

### Влагопоглощение

Влагопоглощение — это способность подложки платы противостоять водопоглощению при погружении в воду. Оно определяется процентным увеличением веса материала печатной платы из-за поглощения влаги в контролируемых условиях согласно стандартным методам испытаний. Большинство подложек имеют значения влагопоглощения в диапазоне 0,01–0,2%.

Влагопоглощение влияет на тепловые и электрические свойства подложки, а также на способность материала противостоять образованию токопроводящей анодной нити (conductive anode filament — CAF) при подаче питания на схему печатной платы.

### Стойкость к дихлорметану

Стойкость к дихлорметану (метиленхлорид, хлористый метилен, ДХМ, фреон 30, хладон 30) является одной из характеристик химической стойкости материала, в данном случае — способности материала печатной платы противостоять абсорбции метиленхлорида.

Так же, как и абсорбция влаги, она выражается процентным увеличением веса материала печатной платы из-за воздействия или замачивания в дихлорметане. Большинство материалов печатных плат имеют значения устойчивости к дихлорметану в диапазоне 0,01–0,2%.

### Влияние поглощения влаги

#### на диэлектрическую проницаемость ( $Dk$ )

Майкл Дж. Гей, директор по высокопроизводительным продуктам Isola Group, говорит: «Влага является одним из источников изменения  $Dk$  в материалах печатных плат. Существуют и другие возможные источники, которые могут потенциально привести к некоторым незначительным изменениям  $Dk$ , но постепенное поглощение влаги является наиболее значимым фактором».

На приведенной ниже диаграмме (рис. 3) показано поглощение влаги при 24-часовом замачивании в деионизированной воде при различных температурах материала Tachyon 100G.

Диаграмма была составлена по результатам испытаний Tachyon 100G. Рассмотрим подробнее проведенный исследователями Isola Group эксперимент.

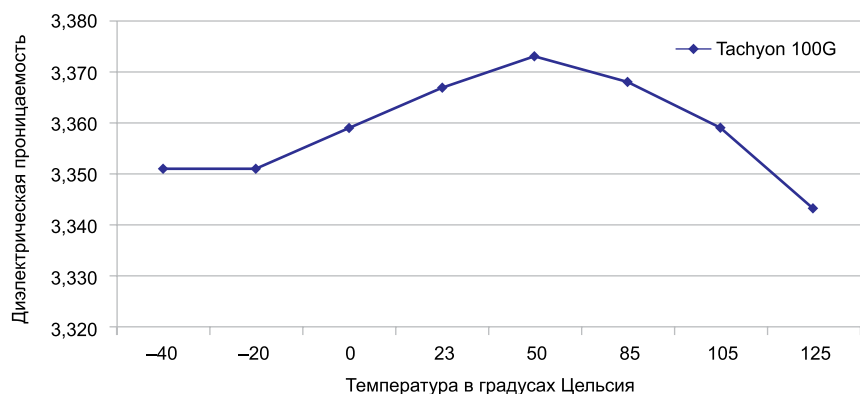
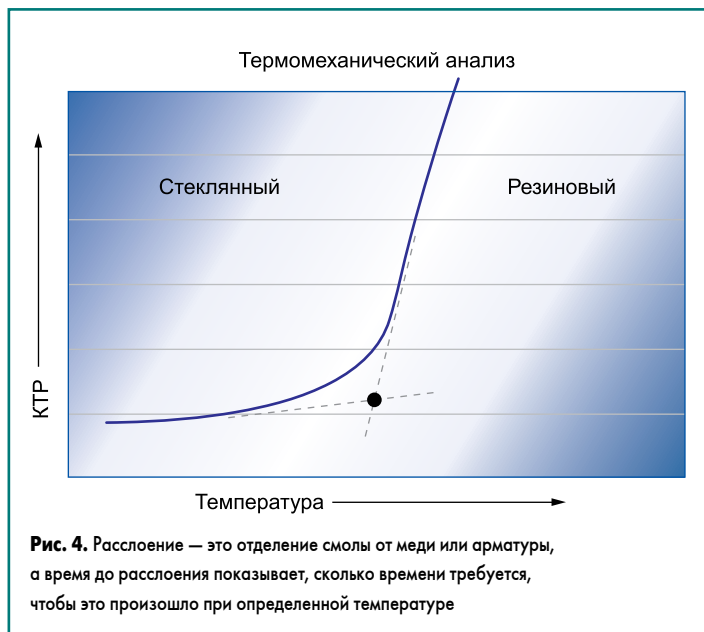


Рис. 3. Диэлектрическая проницаемость в зависимости от температуры для материала печатной платы с низким  $Dk$  Tachyon 100G. Изображение предоставлено Isola Group



#### Методология испытаний

Образец был замочен в воде, извлечен и затем выдержан в течение 4 ч при  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Каждое последующее показание снималось после выдерживания в течение 150 мин при новой температуре.

#### Основные выводы эксперимента

Dk изменялась, как и ожидалось: она увеличивалась по мере перехода воды через фазы, а затем уменьшалась по мере удаления влаги из образца.

Отклик Df также соответствует ожидаемому: медленное увеличение потерь из-за тех же фазовых переходов в удерживаемой влаге, за которым следует уменьшение по мере удаления влаги.

Майкл Дж. Гей объясняет: «Как вы можете видеть, Dk стал примерно на 0,02 выше после того, как материал пропитывался при  $+23^{\circ}\text{C}$ , при комнатной температуре. Это не большая разница, но она может заставить вас задуматься об изменении требований к ширине дорожки для сохранения импеданса в заданных границах. Влагопоглощение зависит и от длины пути, по которому материал достигает равновесного влагонакопления.

Поглощение влаги лакированным ламинатом длится многие недели. А вот в протравленном ламинате это происходит за несколько часов, например, в течение тех часов, когда плата проходит процедуру автоматической оптической инспекции (АОИ). Ее протравленное ядро сигнального слоя наберет максимальное содержание влаги при комнатной температуре, поскольку помещение, где выполняется АОИ, обычно имеет около 60% относительной влажности, и поэтому влага легко доступна».

Но следует учитывать, что в реальной конструкции печатной платы влага может не накапливаться в областях, расположенных вблизи горячих компонентов, испаряясь из платы, например, когда температура достигает  $+80...+90^{\circ}\text{C}$  около самых нагреваемых чипов.

Майкл Дж. Гей также добавляет: «Для высокоскоростных проектов мы рекомендуем, чтобы материалы были сухими перед ламинированием с использованием процесса термического прессования. В таких материалах, как Tachyon 100G, влага не оказывает отрицательного влияния на отверждение, но, как вы можете видеть, влажность приводит к сдвигу Dk».

В случае конвейерного процесса оксидного покрытия печатной платы эффективная сушилка в конце конвейерной линии должна удалять всю влагу с поверхности внутреннего слоя платы. А наилучшей практикой является сушка слоев платы в течение 30 минут при температуре  $+100^{\circ}\text{C}$  или выше. Это особенно актуально, если для печатной платы предполагается последующая бессвинцовая пайка. Предпочтительна сушка на стеллажах.

В других материалах, особенно на основе эпоксидной смолы, влага также может препятствовать реакции отверждения и приводить к снижению термического сопротивления и термических свойств. Рекомендуется прогревать внутренние слои, чтобы избежать этой проблемы.

На уже смонтированной плате можно увидеть аналогичное изменение Dk, если платы не были высушены должным образом. Все полимерные материалы впитывают влагу. Причина, по которой влага вызывает проблемы, заключается в том, что она является полярной молекулой и вмешивается в магнитные поля в непосредственной близости. Именно поэтому некоторые смолы имеют более высокие потери, а некоторые — более низкие: из-за полярности молекул смолы. Например, ПТФЭ — это смола с очень низкой полярностью, дающая материал с низкими потерями.

Майкл заключает: «Влага может легко проникнуть сквозь молекулы смолы и задержаться между ними, поскольку молекулы воды очень малы. Количество воды, которое может поглотить пластик, зависит от количества свободного пространства в затвердевшей смоле. У некоторых видов пластика свободного пространства больше, у других меньше».

#### Механические свойства подложек печатных плат

##### Прочность на отрыв

Прочность на отрыв является мерой прочности связи между медным проводником и диэлектрическим материалом. Она выражается в фунтах силы на линейный дюйм (PLI, или средняя нагрузка на ширину проводника), необходимых для разделения связанных материалов, где угол разделения составляет  $180^{\circ}$ . Европейские единицы — МПа или Н/мм<sup>2</sup>.

Испытания прочности на отрыв проводятся на образцах медных дорожек толщиной 35 мкм (1 унция) и шириной 32–125 мм после производства печатной платы стандартными методами. Испытание проводится при трех условиях:

1. Термическое воздействие: после того как образец плавает на припое при температуре  $+288^{\circ}\text{C}$  в течение 10 с.
2. Повышенные температуры: после того как образец подвергается воздействию горячего воздуха или жидкости при температуре  $+125^{\circ}\text{C}$ .
3. Воздействие химических веществ: после того как образец подвергается определенной серии этапов химического или термического процесса, доступного в ходе производства.



Комментирует Сергей ШИХОВ,  
директор по управлению проектами,  
«А-КОНТРАКТ»:

Базовые материалы печатных плат различаются по множеству характеристик — физических, химических и экономических. Необходимо четко понимать значение данных характеристик и знать, какие из них важны в конкретном проекте. И к сожалению, зачастую приходится искать компромисс.

В статье приведены многие, но отнюдь не все характеристики базовых материалов. Кроме перечисленных выше, можно также назвать:

- устойчивость к возникновению проводящих анодных нитей (CAF);
- устойчивость к формированию проводящих дорожек при поверхностном разряде (СТП);
- тип плетения стеклоткани;
- содержание галогенов;
- прозрачность для ультрафиолетового излучения;
- шероховатость медной фольги (впрочем, это не относится к диэлектрику);
- и другие.

Необходимо отметить фактологическую ошибку автора статьи: фраза «Если температура выше Tg, подложка размягчается и больше не расширяется» не соответствует действительности. При превышении Tg скорость роста КТР увеличивается (что видно на рис. 4). Таким образом следует выбирать материалы со сравнительно высокой Tg, особенно при бессвинцовом монтаже.

**Прочность на изгиб**

Прочность на изгиб — это мера способности материала выдерживать механическое напряжение без разрушения. Она выражается либо в кг/м<sup>2</sup>, либо в фунт/дюйм<sup>2</sup> (KPSI).

Прочность на изгиб обычно проверяется путем поддержки печатной платы на ее краях и приложения нагрузки в центре. IPC-4101 — это спецификация для базовых материалов для жестких и многослойных печатных плат, в которой указана минимальная прочность на изгиб различных материалов печатных плат.

**Модуль Юнга**

Модуль Юнга, модуль продольной упругости, или модуль упругости при растяжении, также характеризует прочность материала печатной платы, а именно его способность сопротивляться растяжению или сжатию при упругой деформации. Некоторые производители ламинатов

печатных плат указывают прочность с использованием модуля Юнга вместо прочности на изгиб. Как и прочность на изгиб, модуль Юнга выражается в силе на единицу площади.

**Плотность**

Плотность материала печатной платы выражается в граммах на кубический сантиметр (г/см<sup>3</sup>) или фунтах на кубический дюйм (фунт/дюйм<sup>3</sup>).

**Время до расслаивания**

Время до расслаивания измеряет, как долго материал будет противостоять расслаиванию — отделению смолы от ламината, фольги или стекловолокна — при определенной температуре (рис. 4). Расслоение может быть вызвано термическим шоком, неправильным выбором Tg материала, влажностью и плохим процессом ламинирования.