

Медведев А.М.

ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ. ФИЗИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

Устойчивость металлизации отверстий к термомеханическим напряжениям обеспечивается прочностью и пластичностью гальванически осаждаемой меди.

Различия в коэффициентах теплового расширения меди и диэлектрика оснований печатных плат создают мощные термомеханические факторы разрыва металлизации отверстий, разрушения внутренних межсоединений в многослойных структурах печатных плат. Стандартные нормы требований к толщине металлизации отверстий, ее прочности и пластичности меди, установились в процессе производства ординарных печатных плат применительно к использованию традиционных технологий пайки оловянно-свинцовыми припоями. Возврат к рассмотрению проблемы пластичности меди обусловлен в первую очередь переходом на бессвинцовые припои, которые отличаются высокой температурой пайки, инициированным общеевропейской директивой RoHS [1]. Более высокие температуры создают большие деформации металлизации отверстий, что заставляет пересмотреть требования к пластичности меди. Вместе с тем, повсеместно наблюдается тенденция к уменьшению диаметра металлизированных отверстий, а значит и уменьшению площади поперечного сечения металлизации. Меньшие сечения имеют меньшее сопротивление разрыву. Поэтому наряду с хорошей пластичностью, металлизация отверстий печатных плат должна обеспечивать и более высокую прочность на разрыв. В связи с этим была исследована деформация металлизации отверстий при нагреве до температур пайки. Цель исследований – пересмотр норм на пластичность меди в отверстиях печатных плат. Показано, что пластичность медных осадков в отверстиях современных печатных плат не должна быть менее 6% [2]. Современные электролиты меднения позволяют получить пластичность меди 12-18% [3].

Ключевые слова: печатные платы, межсоединения, пластичность меди.

Существо проблемы

Элементы межсоединений подвергаются воздействию термических нагрузок в процессе изготовления, монтажа и циклических изменений температур в процессе эксплуатации аппаратуры. Различия в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) проводящих структур и диэлектрика вызывают в элементах электрических соединений термомеханические напряжения различной интенсивности. В продольных исправлениях, армированных стеклотканью, различия в ТКЛР настолько незначительны, что они не сказываются на прочности соединений продольной структуры.

В трансверсальном направлении, перпендикулярном плоскости армирования, различия в линейном расширении настолько значительны ($17 \cdot 10^{-6}$ для меди и $(100 \dots 400) \cdot 10^{-6}$ для диэлектрического основания), что возникающие при температурных нагрузках термомеханические напряжения способны разрушить межслойные соединения.

Известно, что устойчивость металлизированных отверстий к термомеханическим нагрузкам обеспечивается толщиной и пластичностью металлизации. Стандартные нормы требований к металлизации по этим критериям качества установились в процессе многолетней практики изготовления и эксплуатации электронной аппаратуры с печатным монтажом с отношением толщины платы к диаметру отверстия от $1:1$ до $3:1$. При размере сквозных отверстий менее $0,3$ мм это отношение может достигать соотношений $10:1 \dots 20:1$. В таких конструкциях многослойных печатных плат (МПП) отношение жесткостей сечений металлизации отверстий и окружающего их материала основания платы складывается не в пользу металлизации: в условиях температурных воздействий значительно увеличивается деформация металлизации отверстий (рис. 1). Это явление усугубляется уменьшением пластичности медной металлизации с ростом температуры пайки.

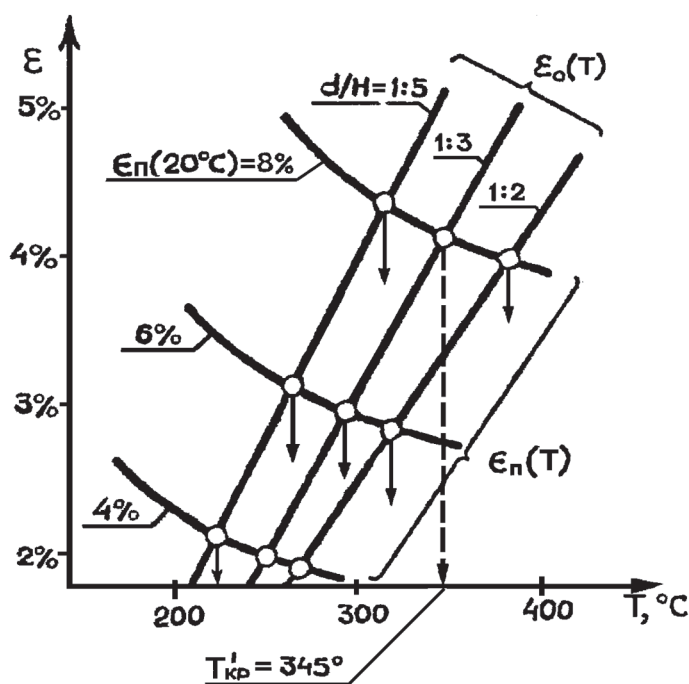


Рис. 1. Ужесточение требований к пластичности металлизации по мере уменьшения диаметра сквозного отверстия

Статистика показывает, что особенно большой поток отказов межслойных соединений наблюдается в аппаратуре, систематически подвергающейся воздействию циклических изменений температур (термоциклов). По данным длительной эксплуатации одного из авиационных комплексов отказы печатного монтажа распределяются следующим образом: металлизированные отверстия — 24 %, внутренние соединения — 72 %, печатные проводники внутренних слоев — 0,1 %, изоляция — 2 %, пайки — 2,5 %, обрывы проводов — 0,3 %, остальное — 0,6 %. Сопоставления количества отказов МПП в стационарной аппаратуре, эксплуатирующейся в условиях относительного постоянства температур, и самолетной, показывают разницу почти в три порядка, что убеждает нас в том, что, если уровень переменных термомеханических напряжений превосходит определенный предел, идет процесс постепенного накопления повреждений, который завершается усталостными разрушениями соединений.

Модель термомеханических нагрузений

Термомеханические напряжения при нагреве приводят к растяжению металлизации вдоль оси отверстия (осевые напряжения) и изгибу контактных площадок, наибольшая концентрация которого сосредотачивается на стыке с металлическим цилиндром отверстия (напряжение изгиба). Типичное искажение формы отверстия при нагреве схематично показано на рис. 2 и на фотографии микрошлифа – рис. 3.

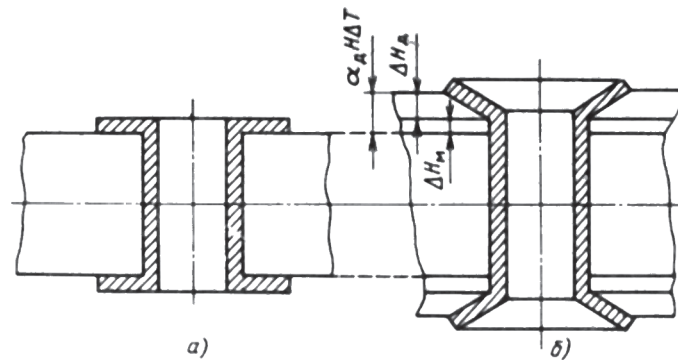


Рис. 2. Искажение формы металлизированного отверстия при нагреве

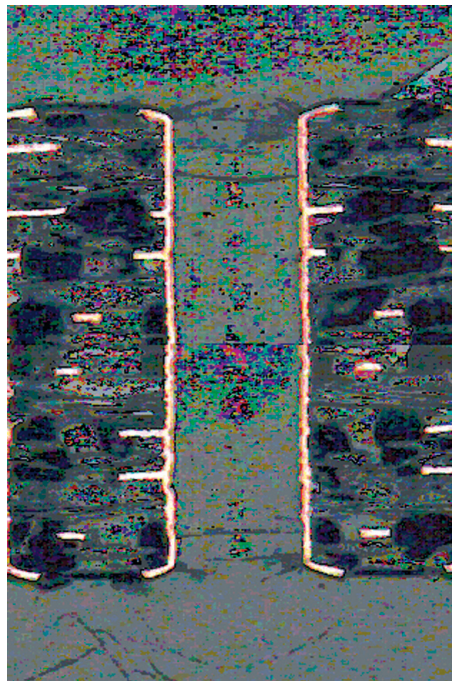


Рис. 3. Микрошлиф металлизированного отверстия после термоудара

В общем случае относительная деформация σ_z металлизации при температурных воздействиях может быть представлена как сумма упругой ε_y и температурной ε_T деформаций. Упругая деформация $\varepsilon_y = \sigma E$ (E – модуль упругости). Температурная деформация $\varepsilon_T = \alpha(T - T_0)$. Отсюда термомеханические напряжения $\sigma = E[(\sigma_z - \alpha(T - T_0))]$. Термомеханические усилия в каждом из элементов металлизированного отверстия:

$$F = E[(\sigma_z - \alpha(T - T_0))] h dZ.$$

Для определения термомеханических характеристик деформации металлизации запишем уравнение равновесия из условия, что сумма всех термомеханических усилий, возникающих в компонентах системы «металлизация – стенки отверстия», должна быть равна нулю (рис. 4):

$$\int_0^{h_M} E_M [(\epsilon_Z - \alpha_M (T - T_0))] h dZ + \int_{h_D}^0 E_D [(\epsilon_Z - \alpha_D (T - T_0))] h dZ = 0$$

После интегрирования и преобразования можно показать, что деформация меди в трансверсальном направлении Z равна:

$$\epsilon_Z = (\alpha_D - \alpha_M) (T - T_0) (1 + J_M/J_D)^{-1}, \quad (1)$$

где α_D и α_M ТКЛР, J_M и J_D – условные жесткости меди и диэлектрика.

Если ϵ_Z превышает предел пластичности медного осадка в отверстии (или $\sigma_P > \sigma_{ПЧ}$), происходит кольцевой разрыв металлизации.

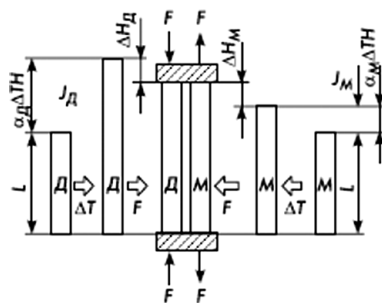


Рис. 4. Модель осевых термомеханических напряжений

Если силы сцепления металлизации со стенками отверстия малы, напряжения сдвига могут реализоваться в разрыве внутреннего соединения. Напряжение сдвига, очевидно, должно увеличиваться по мере увеличения расстояния стыка от нейтральной оси $0-0$ (рис. 5). Расстояние сдвига, если бы он произошел, можно определить, исходя из общих представлений. Но если силы сцепления удерживают металлизацию на стыках отверстия, то развивающееся при повышении температуры напряжение сдвига равно $\sigma_{Сов} = G(\alpha_D - \alpha_M)\Delta T$. Значение разрушающего напряжения сдвига определяют исходя из экспериментальных значений усилия вырыва металлизации из отверстия. На рис. 6 показана фотография разрушения внутреннего соединения в результате сдвига металлизации относительно стенок отверстия.

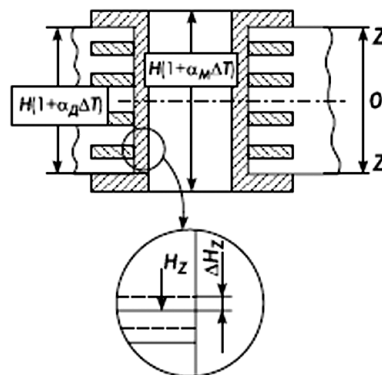


Рис. 5. Сдвиг металлизации с торцов контактных площадок внутренних слоев

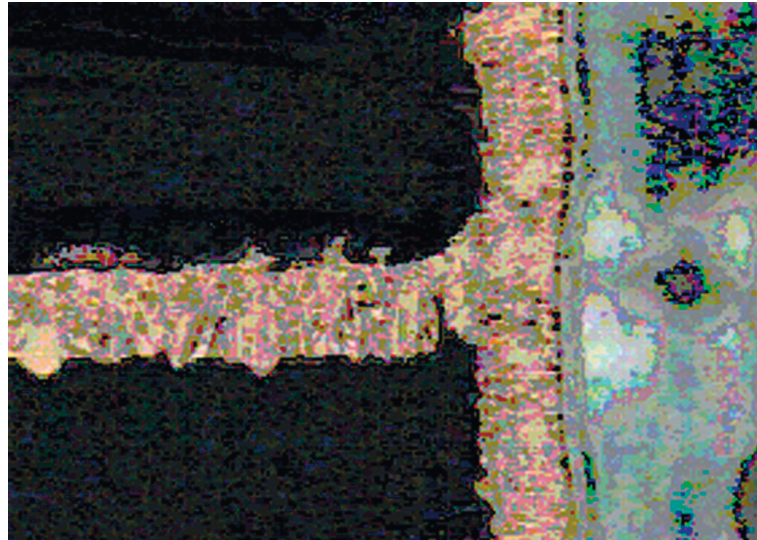


Рис. 6. Фотография микрошлифа разрушенного внутреннего соединения

На рис. 7 показана диаграмма температурной деформации свободно расширяющихся цилиндров меди, полимерных композиционных диэлектриков и результирующей температурной деформации их совокупности, а на рис. 8 – диаграмма деформация – напряжение. Кривая температурного расширения диэлектрического основания имеет перелом на температуре стеклования T_g . Зона упругой деформации меди ограничена значением ε_y .

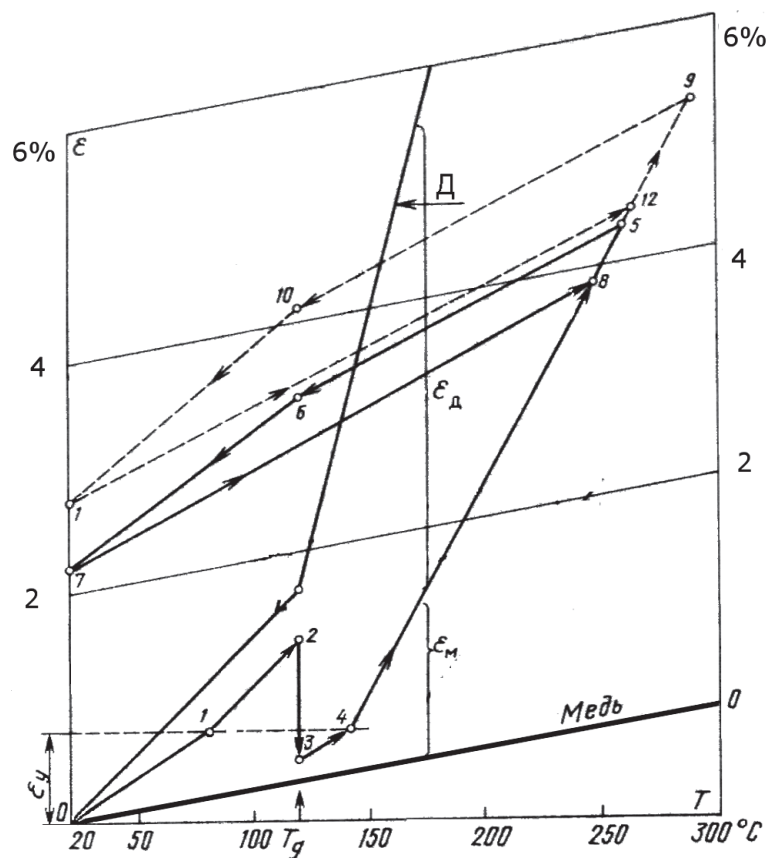


Рис. 7. Диаграмма температурной деформации металлизации отверстия, полученная графоаналитическим методом

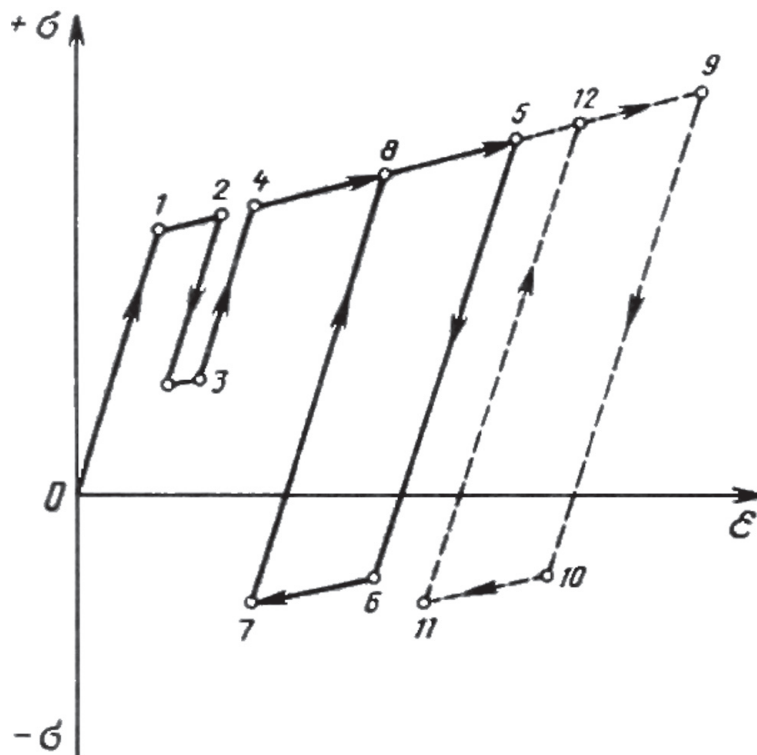


Рис. 8. Диаграмма деформация-напряжение

На участке $0-1$ модуль сдвига меди соответствует участку упругости, т.е. имеет значение G_M , модуль сдвига диэлектрика равен G_D . Распределение деформаций диэлектрика и меди подчиняется соотношению: $\alpha_D/\alpha_M = G_M S_M / G_D S_D$, где S_M и S_D – площади поперечного сечения нагружения медного цилиндра и диэлектрика вокруг него, воспринимавшего нагрузку. Когда в точке 1 деформация меди переходит на участок текучести (участок 1-2), ее модуль уменьшается, поэтому металлизация отверстия деформируется почти вслед за свободным расширением диэлектрика. При температуре стеклования T_g диэлектрическое основание теряет свою жесткость, за счет этого медный цилиндр разгружается. Его деформация принимает значение, соответствующее точке 3. При переходе за температуру стеклования T_g диэлектрик начинает интенсивно расширяться. Однако на начальном этапе это не приводит к большому расширению меди, пока ее деформация не выходит за пределы упругости (участок 3-4). Соотношение деформаций диэлектрика и меди на этом участке:

$$\alpha_D/\alpha_M = G'_M S_M / G'_D S_D. \quad (2)$$

Кривые 5-6-7-8-5 и 9-10-11-12-9 демонстрируют изменения линейных размеров металлизированного отверстия при охлаждении и повторном цикле нагрев–охлаждение для температур пайки 260°C и 290°C соответственно. Наличие гистерезиса в температурной диаграмме деформаций свидетельствует о наличии определенной доли пластической деформации меди – предвестницы усталостных разрушений при циклических температурных нагрузках.

Методика экспериментальных исследований

Известны основные принципы исследований напряжений в металлизации сквозных отверстий на основе использования микрометрических датчиков перемещений, регистрирующих приращение толщины диэлектрического основания и металлического цилиндра сквозного отверстия по мере

нагрева МПП. Повышение точности измерений в широком температурном диапазоне обеспечивается использованием кварцевых держателей образцов и стержней передачи перемещений. Были попытки использования накладных тензометрических микродатчиков для измерения малых удлинений (экстензометров) для исследования деформации металлизации сквозных отверстий во время пайки. Сопоставление результатов измерения температурных расширений этими двумя методами, полученными разными авторами, демонстрирует их неоднозначность из-за неопределенности баз отсчета в первом случае и слабой чувствительности тензометрии для малоразмерных образцов, к каким относятся отверстия МПП – во втором случае.

Автор воспользовался собственной методикой исследования термомеханических напряжений, по которой само исследуемое металлизированное отверстие используется в качестве тензодатчика для измерения его температурных деформаций. Для этого он исходил из следующих предпосылок. Связь изменения омического сопротивления с деформацией: $\Delta R/R = k\varepsilon$, где k – тензочувствительность элемента (в данном случае – самого металлизированного отверстия). Поскольку $R = \rho H/S$, дифференциальная форма выражения $\Delta R/R$ имеет вид $dR/R = d\rho/\rho + dH/H - dS/S$, где ρ – удельное электрическое сопротивление металлизации, H – толщина платы (длина металлизированного цилиндра сквозного отверстия), S – площадь поперечного сечения металлизации отверстия в перпендикулярном направлении относительно его оси. При малом относительном удлинении $d\varepsilon = dH/H$ относительное изменение площади сечения $dS/S = -2\mu(dH/H)$. Поэтому $dR/R = d\rho/\rho + \varepsilon + 2\varepsilon\mu$, где μ – коэффициент Пуассона. Тогда тензочувствительность элемента – металлизации отверстия:

$$k = (dR/R) \varepsilon^{-1} = (1 + 2\mu) + (d\rho/\rho)^{-1}. \quad (3)$$

Выражение (3) состоит из двух частей: геометрической части, зависящей от ρ и отображающей изменение электрического сопротивления только за счет изменения размеров металлического цилиндра вследствие его продольной деформации, и физической части, связанной с изменением удельного сопротивления металлизации при удлинении $d\rho/\rho = B dV/V$ и отражающей линейную зависимость между изменением удельного сопротивления и относительным изменением объема dV/V , B – коэффициент Бриджмена. В случае одноосного нагружения, возникающего в металлизации отверстия при нагреве,

$$d\rho/\rho = B(1 - 2\mu)\varepsilon. \quad (4)$$

Объединяя (3) и (4), получаем:

$$k = 1 + 2\mu + B(1 - 2\mu). \quad (5)$$

Непосредственное влияние температуры на изменение сопротивления металлизации учитывается исходя из известного соотношения: $\Delta R/R = (T + 234)^{-1}$. Для чистой меди $B = 1$, по крайней мере, для температурного диапазона от 0 до 300°C. Отсюда по (5) численное выражение тензочувствительности металлизации отверстий равно 2. Т.е. относительное удлинение металлизации на 1% приводит к изменению сопротивления металлизации отверстия на 2%. Для исследований деформаций в пределах 6% с различимостью в 0,1% необходимая точность измерения сопротивлений практически обеспечивалась четырехзондовым методом с приборами первого класса точности. Для обеспечения контактирования четырех зондов провода к контактным площадкам припаивались холодными галлиевыми припоями, которые после образования твердых растворов выдерживают без разрушения температуры до 800°C (рис. 9).

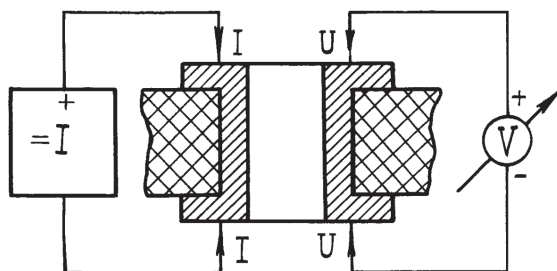


Рис.9. Схема измерения сопротивления металлизации отверстия четырехзондовым методом

Результаты экспериментальных исследований деформации

Результаты измерений деформации металлизированного отверстия диаметром 0,8 мм в МПП толщиной 1,6 мм, показанные на рис.10, дают хорошее совпадение с результатами графоаналитического анализа, проведенного на базе нелинейной модели термомеханических деформаций сквозных металлизированных отверстий.

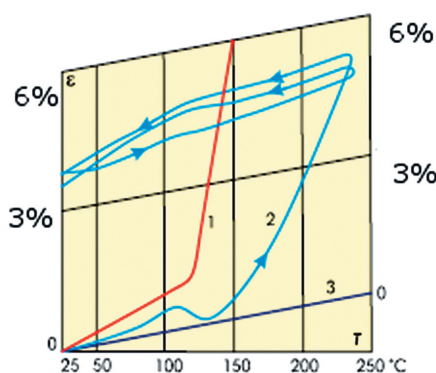


Рис. 10. Экспериментально полученные диаграммы температурной деформации металлизированного отверстия: 1 и 3 — диаграммы свободного расширения диэлектрика и меди; 2 — экспериментальная диаграмма деформации металлизированного отверстия

Сочетание больших деформаций металлизации отверстий при температурных нагрузках и уменьшение пластичности меди может при определенных условиях приводить к разрыву металлизации отверстий или сдвигу металлизации относительно стенок отверстий, если не принять мер для увеличения пластичности гальванических осадков при температурах, соответствующих возможному нагреву МПП. В табл.1 приведены пороговые значения температур разрушения межсоединений в МПП.

Таблица 1. Пороговая температура начала разрушений

Отношение толщины МПП к размеру отверстия, Н/d	2:1	3:1	5:1	10:1	20:1
Пластичность металлизации, %	Пороговая температура, °С				
4	290	250	220	210	190
6	320	290	260	240	220
8	380	350	320	280	260

При больших температурных деформациях, недостаточной пластичности металлизации и непрочном сцеплении металлизации со стенками сквозных отверстий МПП возможно разрушение внутренних соединений. Для выявления такого дефекта достаточно после термоудара (оплавления) спровоцировать окисление (влага + тепло) соприкасающихся поверхностей физического контакта

металлизации отверстий с торцами внутренних контактных площадок и по результатам измерений сопротивления внутренних соединений диагностировать надежность МПП.

Усталостные малоцикловые разрушения возможны только при переходе в область пластических деформаций. И чем глубже температурные деформации уходят в область пластических деформаций, тем раньше начинаются отказы соединений в процессе эксплуатации. Предложенными средствами контроля состояния соединений в МПП начало пластических деформаций обнаруживается как появление гистерезиса в диаграмме *температура – сопротивление* элемента цепи. Проведенные исследования позволяют количественно оценить влияние толщины металлизации сквозных отверстий на температуру, соответствующую началу пластических деформаций (табл.2).

Таблица 2. Начала пластической деформации при нагреве

Толщина металлизации в отверстии МПП, мкм	Отношение толщины МПП к диаметру сквозного металлизированного отверстия (H/d)		
	2:1	3:1	5:1
	Температура начала пластической деформации, °С		
10	75	60	50
15	85	73	55
20	95	80	60
25	100	85	65
30	110	90	70

Локальные дефекты, особенно в виде кольцевых утонений, значительно уменьшают устойчивость металлизации отверстий к циклическому воздействию температур.

Данные исследований демонстрируют бесполезность проведения термоциклирования для разбраковки монтажных изделий путем выявления ослабленных элементов соединений: циклические нагрузки разрушают дефектные элементы и создают усталостные ослабления соединений, близкие к границе различия качественных и дефектных элементов. Это обусловлено еще и тем, что граница качества между дефектными и качественными элементами размыта. Между ними всегда существуют промежуточные состояния, которые характеризуют возможность отказов соединений, вызванных усталостными явлениями.

Заключение

Надежность межсоединений в современной электронной аппаратуре технологически обеспечивается за счет высокого уровня пластичности металлизации печатных плат, устойчивой к малоцикловым усталостным разрушениям, спровоцированным групповым нагревом при многокаскадной пайке и наладочном ремонте печатных узлов.

Литература

1. **Медведев А.М.** Форум по бессвинцовой технологии пайки // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 3.
2. **А. Medvedev.** Optimierte Leiterplatten für die bleifreie Löttechnologie (Physikalische Grundlagen der Verbindungszuverlässigkeit) – Electronische Baugruppen und Leiterplatten – EBL 2008”. Schwabenlandhalle Fellbach. 13 – 14.02.2008.
3. **Шкундина С.Е., Семенов П.В., Ващук Г.А.** Отраслевой стандарт открывает дорогу к использованию новых химических процессов и высококачественных материалов.// ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ: Технологии, оборудование, материалы. – 2010. №1