

Испытания печатных плат — основа гарантии качества их изготовления

На основании аналитических исследований, учитывающих тепловые процессы, протекающие в слое металлизации сквозных отверстий, показано, что при проведении испытаний печатных плат в соответствии с ГОСТ 23752-79 обеспечивается выявление дефектов в слое металлизации, в то время как аналогичные дефекты не определяются при проведении испытаний по ГОСТ 23752.1-92 (аналог стандарта МЭК 326-2-90). Аналитические исследования подтверждены результатами экспериментов.

Эдуард Сахно,
к. т. н.

platarcb71@yandex.ru

Игорь Дорощенко
Алексей Корешков

Введение

При испытании изделий преследуется цель выявить некачественное изделие с отклонением его параметров от значений, заданных техническими требованиями, техническими условиями или стандартами. Так, согласно [1] печатные платы подвергаются приемо-сдаточным, периодическим и типовым испытаниям.

Приемо-сдаточные испытания — это испытания, по результатам которых делается заключение о возможности приемки партии изделий. За партию принимают изделия, изготовленные за ограниченный период времени по единой технологической документации. Иногда к приемке предъявляют партию изделий в объеме сменной выработки. Количество изделий в партии, порядок их комплектования и предъявления устанавливает предприятие-изготовитель по согласованию с потребителем.

Для печатных плат объем выборки и последовательность приемо-сдаточных испытаний указаны в [1]. Одним из важных показателей при этом выступает толщина слоя меди в отверстиях. Особенное внимание к толщине слоя меди в отверстиях объясняется тем, что в процессе эксплуатации печатной платы в составе аппаратуры металлизация отверстия постоянно испытывает переменные во времени термомеханические напряжения, вызванные разностью температурных коэффициентов расширения меди и диэлектрического основания [2]. Устойчивость к термомеханическим нагрузкам обеспечивается нужной толщиной и пластичностью слоя металлизации в отверстиях. В [1] устанавливается средняя толщина слоя меди в отверстиях не менее 0,025 мм для многослойных печатных плат и 0,02 мм для двусторонних печатных плат.

При приемо-сдаточных испытаниях по согласованию с потребителем могут быть установлены следующие уровни контроля: нормальный, усиленный или облегченный.

Испытания обычно начинают с нормального уровня. Если показатель уровня качества по итогам приемки за отчетный период снизился по сравнению с предыдущим отчетным периодом на 0,1% и более,

то осуществляют переход от нормального уровня контроля к усиленному.

Переход от усиленного уровня контроля к нормальному следует осуществлять только в том случае, если показатель уровня качества достиг или превысил показатель, при котором ранее велась приемка по нормальному уровню.

Переход от нормального уровня контроля к облегченному следует осуществлять, если выполнены следующие условия: показатель уровня качества поддерживался стабильным в течение трех отчетных периодов или имел тенденцию роста при приемке по нормальному уровню; технологический процесс стабилен и не было зарегистрировано его нарушений.

Переход от облегченного уровня контроля к нормальному следует осуществлять, если показатель уровня качества по итогам приемки за отчетный период снизился по сравнению с предыдущим отчетным периодом на 0,1% и более или было зарегистрировано нарушение технологического процесса.

Испытания печатных плат проводят с целью периодического контроля качества и стабильности технологического процесса их изготовления. Такие испытания осуществляются не реже одного раза в шесть месяцев, их объем и последовательность указаны в [1]. Периодическим испытаниям подвергают печатные платы, прошедшие приемо-сдаточные испытания. Периодические испытания в опытном и мелкосерийном производстве выполняют на пяти платах, в серийном и крупносерийном производстве — на десяти платах независимо от изготавливаемого количества.

Испытания на устойчивость к токовой нагрузке

В перечень показателей, контролируемых при периодических испытаниях печатных плат, включена проверка устойчивости металлизированных отверстий к токовой нагрузке. Эта проверка имитирует тепловое воздействие на слой металлизации, получаемое платой при пайке элементов, устанавливаемых на печатную плату.

Таблица 1. Испытательный ток по ГОСТ 23752-79 [1]

Диаметр отверстия, мм (по рекомендациям [1])	Испытательный ток, подаваемый в течение 3 с, А	
	Двусторонняя печатная плата (средняя толщина слоя меди 0,02 мм)	Многослойная печатная плата (средняя толщина слоя меди 0,025 мм)
0,3	11	14
0,4	15	18
0,5	18	23
0,6	22	28
0,7	26	32
0,8	30	37
0,9	34	42
1	37	47
1,1	41	51
1,3	49	61
1,5	56	70

Данный вид проверки определен как в [1], так и в [3, 4]. Методика проверки в указанных документах различная. В частности, в [1] проверку устойчивости металлизированных отверстий к кратковременной токовой нагрузке рекомендуется проводить, пропуская в течение 3 с постоянный или переменный ток в соответствии с таблицей 1 на 8–10 отверстиях наименьшего диаметра. Величина испытательного тока, указанная в таблице 1, вычисляется по формуле (1) и округляется до целого числа:

$$I = j \times \pi \times d \times l, \quad (1)$$

где $j = 600 \text{ А/мм}^2$ — рекомендуемая в [1] плотность тока, подаваемого на слой металлизации; $\pi = 3,14$ — константа; d — диаметр отверстия, мм; l — минимальная толщина слоя меди в отверстии, мм; рекомендуется согласно [1] для двусторонних печатных плат 0,02 мм и для многослойных — 0,025 мм.

Перед началом и после окончания испытаний измеряют сопротивление тестируемого отверстия четырехзондовым методом или методом, эквивалентным ему. Сопротивление отверстий определяется как среднее арифметическое значение трех измерений. Измерительный ток при замере сопротивления отверстия четырехзондовым методом не должен превышать 1 А. Результат повторного измерения после пропускания испытательного тока не должен отличаться от первого измерения более чем на 30%. Погрешность измерения не должна превышать 20%. После проведения испытаний металлизированных отверстий на устойчивость к токовой нагрузке отверстия и контактные площадки не должны иметь подгаров, отслоений, изменения цвета поверхности. Побеление диэлектрика вокруг контактных площадок также не допускается.

В [3, 4] рекомендуется оценивать способность слоя металлизации в отверстиях выдерживать установленный испытательный ток в течение 30 с. Значение испытательного тока зависит не от типа печатной платы, а только от диаметра отверстия. При этом приводится своеобразный диапазон диаметров отверстий. В таблице 2 для сведения указана расчетная плотность тока в слое металлизации для двусторонней печатной платы, вычисленная на основе формулы (1) при минимальной толщине слоя металлизации 0,02 мм.

Никаких критериев для оценки результатов испытаний не приведено. Для удобства сравнения предлагаемых методик в таблице 3 указаны значения испытательного тока для двусторонних печатных плат.

Таблица 2. Испытательный ток по ГОСТ 23752.1-92 [3] и ГОСТ Р (проект) [4]

Диаметр отверстия (по рекомендациям [3] и [4]), мм	Испытательный ток, подаваемый в течение 30 с, А	Расчетное значение плотности тока, А/мм ²
0,6	8	212
0,8	9	179
1	11	175
1,3	14	171
1,6	16	159
2	20	159

Таблица 3. Сравнительные значения испытательного тока

Диаметр отверстия, мм	Значение испытательного тока, А		
	Согласно [1] (длительность подачи тока 3 с; плотность тока 600 А/мм ²)	Согласно [3] (длительность подачи тока 30 с; плотность тока — не оговаривается)	Согласно [4] (длительность подачи тока 30 с; плотность тока — не оговаривается)
0,3	11	–	–
0,4	15	–	–
0,5	18	–	–
0,6	22	8	8
0,7	26	–	–
0,8	30	9	9
0,9	34	–	–
1	37	11	11
1,1	41	–	–
1,3	49	14	14
1,5	56	–	–
1,6	–	16	16
2	–	20	20

Примечание. Знак «–» обозначает отсутствие значения параметра в данном документе.

Учитывая различные рекомендации режимов проведения испытаний металлизированных отверстий на устойчивость к токовой нагрузке, указанные в [1] и [3, 4], оценим возможности каждой методики выявить некачественные отверстия по критерию толщины слоя металлизации, используя теплофизические процессы, протекающие в слое металлизации и окружающем пространстве.

Аналитический расчет процесса токовых испытаний

При пропускании тока по слою металлизации выделяется тепловая энергия, которая распределяется по различным каналам:

$$Q_B = Q_M + Q_D, \quad (2)$$

где Q_B — энергия, выделяемая на слое металлизации при пропускании испытательного тока в течение заданного времени, Дж; Q_M — энергия, повышающая температуру медных частей металлизированного отверстия, включающих слой металлизации в отверстии и контактные площадки, Дж; Q_D — энергия, передающаяся от слоя металлизации в диэлектрик, Дж.

Энергия в виде тепла, выделяющаяся на слое металлизации при прохождении по нему испытательного тока, вычисляется по известной формуле [5]:

$$Q_B = I^2 \times R \times t, \quad (3)$$

где I — испытательный ток, подаваемый на металлизированное отверстие, А; R — сопротивление слоя металлизации, Ом; t — длительность пропускания испытательного тока, с.

Сопротивление слоя металлизации вычисляется по известной формуле:

$$R = (\rho \times L) / (\pi \times d \times l), \quad (4)$$

где ρ — удельное сопротивление медного слоя металлизации, Ом·м; для гальванической меди $\rho = 1,9 \times 10^{-8}$ Ом·м; L — толщина печатной платы, м; d — диаметр металлизированного отверстия, м; l — толщина слоя металлизации, м.

Энергия, идущая на нагрев медных частей металлизированного отверстия с контактными площадками, вычисляется по формуле [5]:

$$Q_M = C \times m_M \times \Delta T, \quad (5)$$

где C — удельная теплоемкость медных частей металлизированного отверстия с контактными площадками, Дж/кг·К; для меди согласно [5] $C = 385$ Дж/кг·К; $m_M = (m_{сл} + 2m_{кл})$ — масса медных частей металлизированного отверстия с контактными площадками, включающая

Таблица 4. Числовые значения констант

Параметрические постоянные		N_1 , Ом·м ²	N_2 , Дж/К	N_3 , Дж·м/К	N_4 , Дж·м/К	N_5 , Вт·м ² /К
$\rho = 1,9 \times 10^{-8}$ Ом·м $L = 1,5$ мм $\pi = 3,14$ $\gamma = 8,9 \times 10^3$ кг/м ³ $b = 0,2$ мм $h = 0,035$ мм $C = 385$ Дж/кг·К $\lambda = 0,3$ Вт/м·К	d, мм					
	0,6	$2,85 \times 10^{-11}$	$1,82 \times 10^{-2}$	$170,27 \times 10^{-9}$	$56,76 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-9}$
	0,8	$2,85 \times 10^{-11}$	$3,24 \times 10^{-2}$	$302,7 \times 10^{-9}$	$75,68 \times 10^{-9}$	$2,84 \times 10^{-9}$

Таблица 5. Формулы для вычисления величины перегрева

d, мм	ΔT , К	Используемая формула
0,6	$2,85 \times 10^{-11} \times I^2 \times t / (1,82 \times 10^{-2} \times I^2 + 226,76 \times 10^{-9} \times I + 1,6 \times 10^{-9} \times I \times t/a)$	(15-1)
0,8	$2,85 \times 10^{-11} \times I^2 \times t / (3,24 \times 10^{-2} \times I^2 + 378,38 \times 10^{-9} \times I + 2,84 \times 10^{-9} \times I \times t/a)$	(15-2)

Таблица 6. Формулы для расчета перегрева при испытании по методике ГОСТ 23752-79 [1]

d, мм	I, А	t, с	ΔT , К	Используемая формула
0,6	22	3	$4,14 \times 10^{-8} / (1,82 \times 10^{-2} \times I^2 + 226,76 \times 10^{-9} \times I + 4,8 \times 10^{-9} \times I/a)$	(16-1)
0,8	30		$7,7 \times 10^{-8} / (3,24 \times 10^{-2} \times I^2 + 378,38 \times 10^{-9} \times I + 8,52 \times 10^{-9} \times I/a)$	(16-2)

Таблица 7. Формулы для расчета перегрева при испытании по методике ГОСТ 23752.1-92 [3] и ГОСТ Р (проект) [4]

d, мм	I, А	t, с	ΔT , К	Используемая формула
0,6	8	30	$5,47 \times 10^{-8} / (1,82 \times 10^{-2} \times I^2 + 226,76 \times 10^{-9} \times I + 4,8 \times 10^{-9} \times I/a)$	(17-1)
0,8	9		$6,92 \times 10^{-8} / (3,24 \times 10^{-2} \times I^2 + 378,38 \times 10^{-9} \times I + 8,52 \times 10^{-9} \times I/a)$	(17-2)

массу слоя металлизации в отверстии $m_{сл}$ и массу двух контактных площадок $m_{кп}$, кг; ΔT — температура перегрева медных частей металлизированного отверстия с контактными площадками, К.

Масса слоя металлизации в отверстии вычисляется по известной формуле:

$$m_{сл} = \pi \times \gamma \times d \times L, \quad (6)$$

где γ — плотность медного слоя металлизации, кг/м³; для меди $\gamma = 8,9 \times 10^3$ кг/м³.

Массу контактной площадки можно вычислить по формуле:

$$m_{кп} = \pi \times \gamma \times h \times d \times b + \pi \times \gamma \times h \times b^2, \quad (7)$$

где b — гарантийный пояс, м; h — толщина фольги, м.

На основании (6) и (7) массу медных частей металлизированного отверстия с контактными площадками можно записать в виде:

$$m_M = \pi \times \gamma \times (d \times L + 2h \times d \times b + 2h \times b^2). \quad (8)$$

С учетом (8) выражение (5) можно записать как:

$$Q_M = C \times \pi \times \gamma \times (d \times L + 2h \times d \times b + 2h \times b^2) \times \Delta T. \quad (9)$$

Слой металлизации, нагретый проходящим по нему током, отдает за счет теплоотдачи в толщу диэлектрика энергию, вычисляемую по формуле [5]:

$$Q_D = \alpha \times A \times t \times \Delta T, \quad (10)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; A — площадь поверхности, через которую проходит теплоотдача, м²; t — продолжительность процесса активной теплоотдачи, совпадающая

с длительностью подачи испытательного тока; ΔT — разность температур между слоем металлизации и диэлектриком, совпадающая с температурой перегрева медных частей, К.

На основании анализа формул для вычисления теплового сопротивления, приведенных в [5], можно записать тождество:

$$a / (\lambda \times A) = 1 / (\alpha \times A), \quad (11)$$

где a — длина проводника тепловой энергии, м; λ — коэффициент теплопроводности диэлектрического основания платы, Вт/м·К; для стеклотекстолита равен 0,3 Вт/м·К [6].

Из (11) можно выразить коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \lambda / a. \quad (12)$$

Он зависит от свойств материала диэлектрического основания платы λ и длины проводника тепловой энергии a . На основании формул (10), (9) и (3) условие распределения тепла (2) можно записать в виде:

$$I^2 \times R \times t = C \times \pi \times \gamma \times (d \times L + 2h \times d \times b + 2h \times b^2) \times \Delta T + \alpha \times A \times t \times \Delta T. \quad (13)$$

Таблица 8. Расчетные значения температуры перегрева по методике ГОСТ 23752-79 [1]

d, мм	Величина перегрева ΔT , К, при толщине слоя металлизации в отверстии (l), мкм					Используемая формула
	5	10	15	20	25	
0,6	1618	795	521	384	302	(16-1)
0,8	1700	835	547	403	317	(16-2)

Таблица 9. Расчетные значения температуры перегрева по методике ГОСТ 23752.1-92 [3] и ГОСТ Р (проект) [4]

d, мм	Величина перегрева ΔT , К, при толщине слоя металлизации в отверстии (l), мкм					Используемая формула
	5	10	15	20	25	
0,6	226	113	75	56	45	(17-1)
0,8	161	81	54	40	32	(17-2)

Подставив в (13) $A = \pi \times d \times L$, R из формулы (4) и α из формулы (12) и проведя соответствующие преобразования, можно выразить величину перегрева медных частей металлизированного отверстия с контактными площадками в виде:

$$\Delta T = I^2 \times \rho \times L \times t / (C \times \pi^2 \times d^2 \times \gamma \times L \times I^2 + 2C \times \pi^2 \times d^2 \times \gamma \times h \times b \times I + 2C \times \pi^2 \times d \times \gamma \times h \times b^2 \times I + \lambda \times \pi^2 \times d^2 \times L \times I \times t/a). \quad (14)$$

Для того чтобы упростить последующий теоретический анализ результатов, полученных в ходе использования различных методик испытаний металлизированных отверстий, примем за параметрические постоянные следующие параметры: ρ ; L ; C ; d ; γ ; h ; b ; λ . Их сочетание в формуле (14) можно представить в виде констант:

- $N_1 = \rho \times L$;
- $N_2 = C \times \pi^2 \times d^2 \times \gamma \times L$;
- $N_3 = 2C \times \pi^2 \times d^2 \times \gamma \times h \times b$;
- $N_4 = 2C \times \pi^2 \times d \times \gamma \times h \times b^2$;
- $N_5 = \lambda \times \pi^2 \times d^2 \times L$.

Тогда (13) можно представить как:

$$\Delta T = N_1 \times I^2 \times t / [N_2 \times I^2 + (N_3 + N_4) \times I + N_5 \times I \times t/a]. \quad (15)$$

Числовые значения констант с учетом принятых параметрических постоянных приведены в таблице 4.

С учетом числовых значений констант из таблицы 4 выражение (15) можно представить в виде формул, приведенных в таблице 5. При этом взяты наиболее распространенные диаметры отверстий.

Каждое из выражений (15–1) и (15–2) с учетом особенностей испытаний по [1] можно представить в виде формул, показанных в таблице 6.

Для условий испытаний по [3, 4] каждое из выражений (15–1) и (15–2) запишем в виде, показанном в таблице 7.

Для того чтобы показать возможности выявления дефектных отверстий с заниженной толщиной слоя металлизации при использовании методик [1] и [3, 4], рассчитаем величину перегрева слоя металлизации ΔT по формулам (16) и (17) при вариациях l в пределах от 5 до 25 мкм и длине проводника тепловой энергии $a = 1$ мм.

Величины перегрева слоя металлизации в отверстии при испытании по методике [1] вычислены по формулам (16–1) и (16–2) и приведены в таблице 8.

Величины перегрева слоя металлизации в отверстиях при испытании по методике [3, 4] вычислены по формулам (17-1) и (17-2) и приведены в таблице 9.

Экспериментальные исследования

Для проверки теоретических расчетов были изготовлены печатные платы в количестве 18 штук — по 6 плат в трех группах, толщина слоя металлизации в каждой из которых составляла 5, 10 и 15 мкм при диаметре отверстия 0,6 мм. Каждая группа разбивалась пополам и испытывалась по методике [1] или [3, 4]. Результаты испытаний приведены в таблице 10.

Таблица 10. Результаты испытаний образцов печатных плат

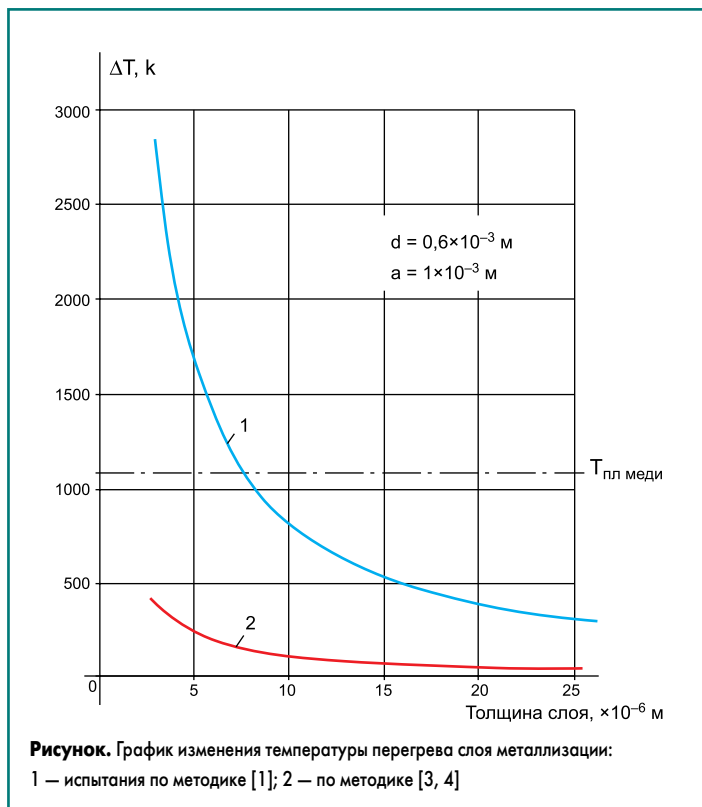
Толщина слоя металлизации (l), мкм	Результаты испытаний трех образцов в каждой из групп	
	по методике [1]	по методике [3, 4]
5	Металлизация выгорела, дефект обнаружен*	Дефект не выявлен*
10	Изменение цвета диэлектрика около отверстия, дефект обнаружен	Дефект не выявлен
15	Изменение сопротивления при проведении испытаний превысило 30% у двух из трех плат. Дефект выявляется частично	Дефект не выявлен

Примечание. * Под дефектом понимается заниженная толщина слоя металлизации.

На рисунке приведен теоретический график изменения температуры перегрева для отверстия диаметром 0,6 мм при проведении испытаний по двум разным методикам. Рисунок построен по формулам (16-1) и (17-1) при вариациях l в пределах от 5 до 25 мкм и длине проводника тепловой энергии a = 1 мм.

Заключение

Теоретические расчеты и проведенные эксперименты позволяют утверждать, что методика испытаний устойчивости металлизированных отверстий к кратковременной токовой нагрузке, изложенная в [1], является более информативной и позволяет обнаружить нестабильность технологического процесса металлизации отверстий при проведении периодических испытаний и выявить отверстия с заниженной толщиной слоя металлизации, то есть обнаружить дефект. Методика [3, 4] не позволяет этого сделать и является менее информативной.



Литература

1. ГОСТ 23752-79 ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ. Общие технические условия.
2. Медведев А. М. Надежность и контроль качества печатного монтажа // М.: Радио и связь. 1986.
3. ГОСТ 23752.1-92 ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ. Методы испытаний.
4. ГОСТ Р (проект) ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ ЖЕСТКИЕ. Методы испытаний физических параметров. www.cniti-technomash.ru
5. Кухлинг Х. Справочник по физике. Перевод с нем. под ред. Е. М. Лейкина // М.: Мир. 1985.
6. Лысов В., Кочергин В. Печатные платы с металлическим основанием // Печатный монтаж. 2007. № 3.