

Продолжение. Начало в № 2 '2008

Введение в теорию прочности паяных соединений

В предыдущей части статьи в общем виде были рассмотрены принципиальные аспекты технологии низкотемпературной пайки, которые опосредованно входят в понятие формирования паяного соединения (далее ПС), определяющего его прочностные свойства. Было показано, что, за исключением специфических эксплуатационных задач силовой и конструктивной электроники, для реализации достаточной прочности коммутационных соединений по существу не требуется проведения дополнительных расчетов и механических испытаний, если правильно представлять себе суть понятия формирования соединения.

**Александр Парфенов,
к. т. н.**

Так что же это такое — формирование ПС? Его внешняя геометрическая форма на основе умозрительного восприятия ее работниками ОТК или некий объемно-геометрический чертеж, составляемый исходя из физико-химических представлений о внутренней структуре шва и качестве состояния поверхности; тем более, что по Гриффитсу снижение прочности от поверхностных дефектов в двое сильнее, чем от наличия внутренних, примерами которых пестрят непрофессиональные публикации... Откуда в различных стандартах и руководящих материалах берутся столь различные рекомендации по топологии контактных площадок (далее КП) и геометрии отверстий и почему до сих пор продолжают бесконечные расчеты их размеров, формы галтелей и т. п.?

Видимо, не дает кому-то покоя еще советская сверхзадача — научиться управлять кинетикой самопроизвольных физико-химических процессов, относящаяся к аспекту «научного ясновидения». Основным аргументом проведения подобных расчетов является обеспечение самоцентрирования поверхностно-монтируемых ингредиентов (ПМИ) в процессе оплавления. Для этого, уверяю вас, ничего не надо рассчитывать! Для реализации самоцентрирования необходимо, чтобы растекание припоя происходило под действием исключительно сил поверхностного натяжения, без влияния силы тяжести и механического давления. В этом случае должно выполняться условие сферичности исходного объема припоя [1]:

$$P_{\text{лапласово}} \gg P_{\text{гидростат.}} \quad \text{или} \quad \frac{2\sigma}{R} \gg \frac{4\pi R^3 \rho \times g}{3S} \quad (1)$$

Принимая площадь S основания сферы равной R^2 [1], получим:

$$R \ll \frac{3\sigma}{2\pi \times \rho \times g} \quad (2)$$

Для пайки припоем ПОС-61 с простым канифольным флюсом $\sigma = 390$ дин/см [2], откуда

$$R \ll \sqrt{\frac{33 \times 90}{6,28 \times 8,59 \times 80}} = 0,149 \text{ см} \cong 1,5 \text{ мм.}$$

При этом объем припоя:

$$V = 4/3\pi R^3 = 14 \text{ мм}^3.$$

Памятуя о знаке неравенства (2), уменьшим объем на порядок: $V = 1,4 \text{ мм}^3$. При 50%-ном объемном содержании припоя в пасте, объем последней составит $\sim 2,8 \text{ мм}^3$, то есть даже такой большой объем пасты при толщине трафарета 0,15 мм будет обеспечивать эффект самоцентрирования на КП размером до 4,5×4,5 мм минимум.

В сущности, за формирование ПС на ПМИ отвечают три фактора: активность флюса, режим пайки, согласованный с температурным интервалом активности, и размер КП, адекватный оптимальной дозировке припоя, достаточной для самопроизвольного физического формирования размеров галтелей и величины зазора. Если первые два фактора взаимосвязаны однозначно, то с дозировкой припоя дело обстоит значительно хуже. Возьмем, например, стандартный корпус конденсатора 1206 с допусками на габаритные размеры (рис. 1) по стандарту IPC-CM-782A или по различным версиям стандарта IPC-7351. Рекомендуемая топология КП представлена на рис. 2.



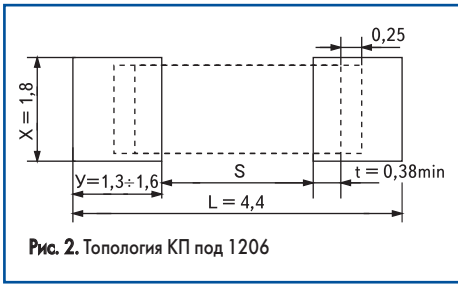


Рис. 2. Топология КП под 1206

Поскольку подавляющее большинство производителей ПМИ выпускают их почти по минимальным размерам (рис. 1, 2), то при установке на указанные на рис. 2 КП, последние глубоко (0,38 mm) заходят под корпус ПМИ за пояс металлзации $c = 0,25$. Поскольку (рис. 3) в сечении I-I толщина корпуса h_1 не менее чем на 0,1 мм больше толщины его по керамике (h_2) за счет «двойного» слоя металлзации, то в сечении II-II вдвое больший слой припоя (приняв зазор δ в сечении I-I равным 0,05 мм) создаст при эксплуатации на повышенных температурах усилие отрыва ($P_{от}$) от удвоенного по сравнению с сечением I-I термического расширения. Если учесть, что действующее в шве (сечение I-I) трехосное напряженное состояние растяжения уменьшает термическое удлинение практически до нуля за счет термической релаксации напряжений растяжения, то при отсутствии спаив в сечении II-II удлинение литого припоя, равное ~50%-ной пластичности, или 0,05 мм, либо разрушит спай в сечении I-I, либо срежет торцевую металлизируемый слой конденсатора.

Что же делать в таком случае конструктору РЭА? Есть два варианта: либо размеры X и L (рис. 2) брать по максимуму, а размер рассчитывать по формуле (рис. 1):

$$S = \ell_{\max} - 2c_{\min}$$

либо проектировать КП по фактическому размеру ПМИ, приобретая их у постоянного и надежного поставщика или производителя, что, по сути, и рекомендует ЗАО «Предприятие «ОСТЕК» в Приложении к бюллетеню «Поверхностный монтаж» («Толсто пленочные резисторы. Геометрические размеры»), если, конечно, отбросить утверждение, что «минимальные отклонения геометрических размеров (0,25 мм по I_2) помогают (!) обеспечивать качество паяных соединений».

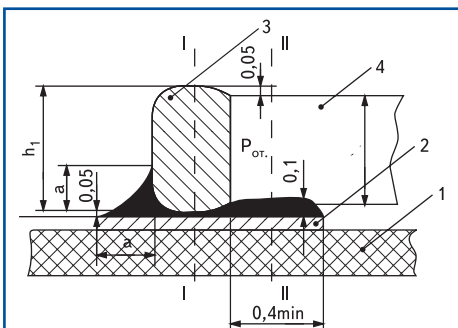


Рис. 3. Структура и размеры поверхности монтируемого ингредиента:

- 1 — печатная плата; 2 — КП;
- 3 — металлзация; 4 — керамический корпус

Расчет топологии КП должен исходить из физически адекватной дозировки припоя и формы паяного соединения. Физическая адекватность формы определяется высотой и радиусом кривизны галтелей, величиной зазора и состоянием поверхности.

Начнем с галтели. Галтель — это катет мениска припоя на перпендикулярной к длине шва вертикальной плоскости торца (или образующей поверхности) одного из соединяемых элементов. Для случая подъема жидкости по вертикальной стенке известная формула Жюрена для капилляра:

$$h_{\text{кап}} = \frac{4\sigma \times \cos\theta}{d \times \rho \times g} \quad \text{или} \quad h_{\text{кап}} = \frac{2\sigma \times \cos\theta}{r \times \rho \times g} \quad (3)$$

принимает вид:

$$h_{\text{ст}} = \frac{\sigma \times \cos\theta}{\rho \times g}, \quad (4)$$

где отношение σ/ρ берется на единицу ширины « θ » вертикальной стенки. В предельном случае для поверхностного натяжения припоя ПОС-61, $\sigma = 331$ дин/см при использовании «активного флюса» $ZnCl_2 + NH_4Cl$, для которого можно считать $\cos\theta = 1$ высота галтели:

$$h_{\text{ст}} = \frac{331}{1 \times 8,5 \times 981} = 0,0397 \text{ см} \approx 0,4 \text{ мм.}$$

Высоту вертикальной галтели на угловых стенках определяют по формуле (3):

$$h_{\text{в.угл}} = \frac{2\sigma \times \cos\theta}{a \times \rho \times g}, \quad (5)$$

где a — гипотенуза катетов галтели для заданной их величины. Вертикальная галтель имеет переменное сечение в отличие от горизонтальной.

Следует отметить, что увеличение галтели сверх размера, рассчитанного по формуле (4), то есть $h_{\text{ст}} \approx 0,5(0,4 + \delta)$, где $\delta \approx 0,1$ — величина зазора, для электроники принципиально не требуется. В конструкционной пайке величина $h_{\text{ст}} > 1,5$ мм также не используется, за исключением специфических задач, так как любое увеличение галтели связано с избыточным количеством припоя, за счет которого в галтели формируются поры и флюсовые включения, превращающие ее в «мусоросборник», а не в конструктивный элемент ПС.

Для наиболее часто встречающегося типоразмера конденсатора 1206 (рис. 1): $\ell = 3,2$ мм, $\beta = 1,65$ мм, $c = 0,4$ мм с учетом половинного катета галтели по боковой стороне металлзации, размеры КП по рис. 2 должны быть следующие:

$$\begin{aligned} X &= \beta + 0,4 \quad (2,0 \text{ мм min}), \\ Y &= 0,5 + 0,45 \quad (1 \text{ мм max}), \\ L &= (0,5 \times 2) + \ell = 4,2 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Размеры КП для остальных типов корпусов вычисляются исходя из принципа подобия. Для корпусов 0603 и менее выступание КП за длину корпуса ПМИ с каждой стороны может быть уменьшено до 0,4 мм, но не менее 0,35 мм при наличии совершенного автоматизированного контроля качества ПС.

Фактический объем припоя, необходимый для оптимального формирования одного ПС, определится как сумма галтельных объемов и объема шва с усредненным зазором 0,1 мм:

$$\begin{aligned} V_z &= 0,5(0,5^2 \times 2,05/2) = 0,128 \text{ мм}^3, \\ V_{ш} &= 0,4 \times 1,65 \times 0,1 = 0,066 \text{ мм}^3, \\ V_{np} &= 0,128 + 0,066 = 0,194 \text{ мм}^3. \end{aligned}$$

В паяльной пасте ПС ПОС-61К [3] объемом 220 см³/кг с содержанием порошка 90% при ρ связки 0,93 г/см³ содержится 58% об. порошка и 42% об. связующего (или флюсующей композиции). Тогда объем пасты при 0,194 мм³ припоя составит:

$$V_{np} = 0,194 \times 100/58 = 0,33 \text{ мм}^3.$$

При размере контактной площадки $2,05 \times 1 = 2,05$ мм² толщина используемого трафарета составит:

$$t_{mp} = 0,32/2,05 = 0,159 \text{ мм} \approx 0,16 \text{ мм.}$$

Учитывая, что фактическая толщина отпечатка пасты с учетом сжатия его давлением ракеля получается больше, чем толщина трафарета, то вполне достаточно использовать трафарет толщиной 0,15 мм. Поскольку объемно-весовые характеристики отечественных и импортных паст различаются незначительно (в пределах 1–3% об.), указанную толщину трафарета для паст с неудаляемыми остатками можно считать унифицированной.

Паяльные пасты с водосмываемыми остатками флюсующей композиции обычно содержат 85% порошкового припоя, или на 1 кг пасты в ней содержится флюсующей композиции на 1/3 по весу больше, или на 42/3 = 14% об. Увеличение объема композиции эквивалентно увеличению объема припоя с 0,194 мм³ до

$$V_{np} = 114 \times 0,194/100 \approx 0,22 \text{ мм}^3,$$

что соответствует увеличению объема пасты до

$$V_n = 0,22 \times 100/58 = 0,38 \text{ мм}^3,$$

для которого толщина трафарета будет равна

$$t_{тр.водосм} = 0,38/2,05 = 0,19 \text{ мм.}$$

Поскольку металлические ленты по ГОСТ выпускаются с минусовым допуском, для изготовления трафарета ленту из БрБ2 или 1Х18Н10Т следует брать толщиной 0,2 мм.

Расчет расхода пасты на один ПМИ (2 пайки) по рис. 2, 3 при $\gamma_{пасты} = 4,5$ г/см³ ведется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} V_{припоя} &= 2(X \times a^2/4 + X \times c \times \delta) = \\ &= 2(X \times 0,5^2/4 + X \times 0,4 \times 0,1) = 0,2X \text{ мм}^3, \quad (6) \end{aligned}$$

$$V_{пасты} = 0,2X \times 100/58 = 0,34X \text{ мм}^3, \quad (7)$$

$$P_{пасты} = 0,34X \times \gamma. \quad (8)$$

Весовой расход пасты на один ПМИ для корпуса 1206 при $X = 2,05$ мм составит: $V_{припоя} = 0,4$ мм³,

$V_{пасты} = 0,68 \text{ мм}^3$, $P = 0,34 \times 2,05 \times 0,0045 = 0,00315 \text{ г} \approx 3,2 \text{ мг}$.

Предложенная унификация размеров ПМИ, топологии КП и толщин трафаретов позволяет получать качественные ПС с самопроизвольным формированием плоского зазора и кривизны галтелей с прочностью не ниже прочностных свойств припоя ПОС-61 (см. ТвЭП № 2 '2008, стр. 51, табл. 2) при температуре оплавления $230 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \dots 10 \text{ }^\circ\text{C}$ с использованием флюсующей композиции пасты, обеспечивающей поверхностное натяжение расплава ПОС-61 на уровне $\sigma_{ПОС-61} \leq 350 \text{ дин/см}$. Данное значение $\sigma_{ПОС-61}$ принято не потому, что температура оплавления пасты на $\sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже оптимальной температуры волны припоя или жала паяльника ($260 \dots 280 \text{ }^\circ\text{C}$) и для компенсации этого снижения необходимо пропорционально снизить поверхностное натяжение припоя за счет ПАВ во флюсе. Для случая пайки оплавлением закон самопроизвольного растекания припоя при наличии «принудительного смачивания» за счет предварительного нанесения пасты по всей поверхности оплавления КП не играет существенной роли. К тому же, высота вертикального подъема припоя, скажем, в капилляре диаметром 1 мм, прямо пропорциональна $\sigma_{пр}$ (1), например, для припоя SAC с $\sigma = 660 \text{ дин/см}$ равна 29 мм, а для припоя ПОС-61 с «активным» флюсом и $\sigma = 331 \text{ дин/см}$ — 16 мм, и этого более чем достаточно для пайки волной или погружением печатных плат.

Тем не менее, только значение $\sigma_{пр} \leq 350 \text{ дин/см}$ позволяет избежать образования сосулек, перемычек и «однобоких» галтелей (односторонние платы) при пайке волной, а также «манхеттенского эффекта» и замыканий при оплавлении и «тягучести» припоя за жалом паяльника. К тому же, принципиальный подход к решению этой задачи позволяет также решить проблему совместимости неудаляемых остатков флюсующей композиции пасты, трубчатого припоя и жидкого флюса с лаками, компаундами, клеями и адгезивами [3].

К сожалению, фундаментальные аспекты технологической науки плохо изложены в различных стандартах и руководящих материалах, поэтому для специалистов, не владеющих профессионально теорией пайки, но пытающихся подвести некую псевдонауку под собственное видение процесса, все кончается плачевно! Достаточно вспомнить использование сплава «Розе» ($T_{пл} = 96 \text{ }^\circ\text{C}$) для ступенчатой пайки или пайки теплочувствительных элементов с применением «инактивного» канифольного флюса ФКС_{пр}, нижняя температура активности которого по ОСТ4.ГО.033.200 равна $220 \text{ }^\circ\text{C}$. Непонимание сути порога активности для одних кончалось самообманом; для других — фальсификацией установленных режимов пайки для спецтехники, поскольку паять с канифолью сплавом «Розе» при температуре ниже $T_{пл}$ основного припоя ПОС-61 невозможно.

В телескопических паяных соединениях (пайка в отверстие) зазор самопроизвольно за счет капиллярных сил не формируется. Более того, за счет различий в ТКЛР стеклотекстолита, припоя и медного вывода ЭРИ в соеди-

нении возникают термические напряжения. Величина зазора δ , обеспечивающая минимальное значение напряжений, определяется из условия равенства температурных деформаций шва $\alpha \times \delta \times T$ и разности температурных деформаций соединяемых деталей $\alpha_2 \times d \times T - \alpha_1 \times (d + \delta) \times T$, откуда:

$$\delta = \frac{d(\alpha_2 - \alpha_1)}{(\alpha_2 + \alpha_1)}, \quad (9)$$

где α_1 — КТР стеклотекстолита, α_2 — медного вывода, а α — КТР припоя. Для $d = 1 \text{ мм}$:

$$\delta = 1 \times (17 \times 10^{-6} - 14 \times 10^{-6}) \times (24 \times 10^{-6} + 14 \times 10^{-6}) = 0,079 \text{ мм},$$

то есть разность диаметра отверстия и вывода равна 2δ или 0,16 мм.

В формуле (9) не учтено влияние совместной температурной деформации на величину зазора. Уменьшение поперечного сечения зазора найдем исходя из условий равенства объемов деформированного δ_T и недеформированного δ_0 зазора:

$$\delta_0^2 \times \pi \times d(1 + \alpha_2 \times T) \times (1 - \alpha \times T) = \delta_T^2 \times \pi \times d. \quad (10)$$

Принимая $\delta_0 = \delta$, по формуле (9) получим:

$$\delta_T = d(\alpha_2 - \alpha_1) \frac{\sqrt{(1 - \alpha \times T) \times (1 + \alpha_2 T)}}{(\alpha_2 + \alpha)}. \quad (11)$$

Считая начало деформации с начала кристаллизации, то есть с $T_{пл}$ ПОС-61 $\approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\delta_T = 1 \times 3 \times 10^{-6} \times \frac{\sqrt{0,9985}}{0,000041} = 0,072 \text{ мм}.$$

Или разность диаметров отверстия и вывода равна 0,14 мм.

С достаточной долей объективности разность диаметров вывода и отверстия можно принять равной 0,15 мм, тогда интересные конструктора соотношения $d_{вывода}$, $d_{отверстия}$ и оптимальные размеры контактных площадок можно иллюстрировать таблицей.

При пайке стыковых соединений конструктивных элементов на платах необходимо обеспечивать так называемый «установочный» зазор [4], в особенности при пайке двухфазными припоями (в частности, SAC), чтобы не получить в центре шва ослабленную зону.

Таблица. Рекомендуемые размеры отверстий и КП в зависимости от $d_{вывода}$

$d_{вывода}^*$, мм	$d_{отверстия}$, мм	Диаметр контактных площадок (min), мм		
		IV-V кл.	III кл.	I-II кл.
0,55	0,7	1,2	1,4	1,7
0,75	0,9	1,4	1,6	1,9
0,95	1,1	1,6	1,8	2,2
1,15	1,3	1,9	2,4	2,8
1,45	1,6	2,2	2,6	3,0*
1,75	1,9	2,5	3,2	3,6*

Примечание:

* Диаметр выводов идет с минусовым допуском. Увеличение диаметра КП принято для устранения «однобоких» паяк на односторонних платах при смещении вывода к стенке отверстия.

При пайке к моменту окончания формирования ПС по длине одной или двух соединяемых деталей устанавливается квазиравновесное тепловое состояние, описывающееся гауссовским распределением:

$$T_{\ell_i} = T_n \times e^{-m\ell_i}, \quad (12)$$

где T — температура в точке на расстоянии ℓ_i от стыка; m — коэффициент, равный

$$\sqrt{\frac{\alpha_0 \times P}{\lambda \times S}},$$

в котором α_0 — коэффициент теплообмена поверхности детали со средой $\approx 0,001 \div 0,002$; λ — коэффициент теплопроводности; P — периметр сечения; S — площадь сечения детали; T_n — температура пайки.

Поскольку при тепловом расширении деталей зазор уменьшается, важно технологически выставить «установочный» зазор, равный оптимальному, плюс величина термического удлинения деталей на начало кристаллизации припоя. Для случая местного нагрева удлиненные детали длиной ℓ за счет термического расширения определятся:

$$\theta = \int_0^{\ell} \alpha \times (T_n \times e^{-mx} - T_{окруж}) \times dx, \quad (13)$$

где α — КЛР детали. После преобразования получим:

$$\theta = \alpha \times \ell \times \left[\frac{T_n}{m \times \ell} \left(1 - \frac{1}{e^{m\ell}} \right) - T_{окруж} \right]. \quad (14)$$

Суммарное уменьшение зазора при пайке двух деталей длиной ℓ каждая составит 2θ . В принципе можно вообще уйти от «установочных» зазоров стыковых соединений, связанных с прочностью структурно неоднородных швов. Например, для торцевых стыковых соединений поверхностно монтируемых выводов плат просто делать прорези в «пяточке» основания на глубину оптимального зазора, поскольку удлинением выступов $\ell = 0,15 \text{ мм}$ можно практически пренебречь.

Однако существует и декларируется в литературе и стандартах ряд других аспектов прочности ПС, в частности, технологических испытаний, реализация которых является просто бессмысленной. Например, фирмой ТДК рекомендуются сдвиговые испытания (п. 9) припаянных конденсаторов усилием 5N ($\sim 500 \text{ г}$) перпендикулярно центру боковой поверхности.

При $\tau_{ср}$ ПОС-61 = $3,4 \text{ кгс/мм}^2$ усилие средне правильно сформированных соединений составляет для корпуса 1206 — 12 кгс min ($S_{ср} = 3,6 \text{ мм}^2$), что совершенно не согласуется с величиной испытательной нагрузки. Следовало бы данную нагрузку выбирать относительно значения $\sigma_{02} = 1,1 \text{ кгс/мм}^2$, то есть равной 4 кгс, притом только для данного типа корпуса!

Точно также неясен смысл испытаний на изгиб (рис. 4), кстати, соответствующий статическим испытаниям по ГОСТ 24167-80, но с фиксированным прогибом по длине 45 мм. Согласно нормативам ССБТ, среднестатистический работник производства не ощущает заметной физической нагрузки при усилиях до 1,5 кгс.

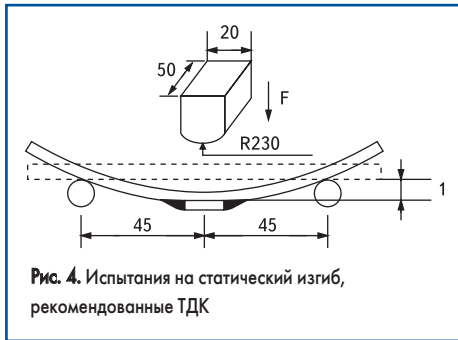


Рис. 4. Испытания на статический изгиб, рекомендованные ТДК

Подобные механические усилия на плату в процессе монтажа могут создаваться на операциях разделения плат на «Маэстро», механической установки штырей и выводов, расклепки выводов и хвостовиков, а также в процессе сборки и пайки волной плат с крупногабаритными и точными изделиями, приводящими к самопроизвольному неконтролируемому прогибу платы в отсутствии специальных приспособлений.

Например, печатная плата шириной 200 мм и толщиной 1,5 мм на длине 100 мм прогибается от усилия 1,5 кгс на $y = 12$ мм. Угол дуги от вертикальной оси составляет 13° , радиус дуги равен 420 мм. При этом на длине 45 мм, в отличие от рис. 4, прогиб составляет не 1 мм, а 2,2 мм. Если положить, что по центру прогиба установлен ПМИ длиной 2 мм, то его прогиб на половинной длине в 1 мм замерить невозможно, но можно просчитать. Для малых углов справедливо соотношение:

$$y \times \alpha = \ell (\alpha^2 / 2), \quad (15)$$

где $y = 12$ мм, $\ell = 100$ мм, откуда:

$$100 \times \alpha = 24 \text{ или } \alpha = 0,24_{\text{рад}} \times 53,32 = 13,7^\circ,$$

$$R = \ell / \alpha = 100 / 0,24 = 417 \text{ мм.}$$

То есть α и R соответствуют фактическим значениям опыта. Тогда прогиб на длине 1 мм составит:

$$y = R (1 - \cos \alpha),$$

а при

$$\alpha = 1/Ry = 1/2R = 1/834 = 0,012 \text{ мм.} \quad (16)$$

Если учесть, что реальное удлинение в сечении ПС составляет 4,5–15% от реальной пластичности припоя $\delta = 32\%$, то при усредненном зазоре 0,075 мм и максимальной пластичности шва 15% удлинение уже составит $\Delta \delta = 0,075 \times 0,15 = 0,01125$ мм max, то есть при неконтролируемом прогибе плат при сборочно-монтажных операциях достаточно легко исчерпывается весь ресурс пластичности ПС (16). Иными словами, проведение испытаний, грубо говоря, с изгибающим усилием $P = 1/2,2 = 0,45$ от неконтролируемой минимальной величины (прогиб на $\ell = 45$ мм) ничего не дает. Гораздо важнее все подобные механические работы обеспечить необходимыми прецизионными приспособлениями, исключаящими подобные механические воздействия.

В заключение необходимо остановиться на критериях прочности ПС при теплосменах. Разрушение ПС при теплосменах называют термической усталостью. В зависимости от величины термических напряжений различают два вида термоусталости: многоцикловую и малоцикловую. Многоцикловая усталость возникает при малых упругих деформациях и характеризуется пределом выносливости при $N = 1 \div 100$ млн циклов нагружения. Малоцикловая усталость сопровождается высокими нагрузками с упругопластической деформацией в течение каждого цикла и характеризуется пределом выносливости при $N = 0,1 \div 100$ тыс. циклов нагружения.

Механизм и причина много- и малоциклового усталости одинаковы: разнородные материалы и неоднородность паяного шва. Для ПС в электронике характерна малоцикловая усталость, которая начинается с образования зародышевой трещины (0,001 мм), ее подрастания до макроразмера 0,1–0,5 мм, после чего наступает мгновенное разрушение. Количественная оценка прочности ПС в электронике с помощью критерия Коффина-Мэнсона приведена в работе [5]:

$$N_T = 0,25 (\epsilon_B / \epsilon_{II})^2, \quad (17)$$

где N_T — долговечность, определяющая первый момент зарождения трещины; ϵ_{II} — размах пластической составляющей деформации; ϵ_B — остаточная деформация припоя при разрыве.

Размах пластической составляющей деформации рассчитывается по формуле:

$$\epsilon_{II} = \Delta \epsilon - \epsilon_y = (2(\alpha_\delta / E)) - (2(2\alpha_T / E)), \quad (18)$$

где $\Delta \epsilon$ — полная деформация; ϵ_y — упругая составляющая деформации; σ_B и σ_T — пределы прочности и текучести припоя соответственно:

- для припоя ПОС-61:

$$\begin{aligned} \epsilon_{II} &= 2 \times 47 / 12\,000 - 2 \times 26 / 12\,000 = 0,0037; \\ \epsilon_{B \text{ ПОС-61}} &= 0,25 (25\%); \\ N_{T \text{ ПОС-61}} &= 0,25 (0,25 / 0,0037)^2 = 1140; \end{aligned}$$

- для припоя ПОИНКС:

$$\begin{aligned} \epsilon_{II} &= 2 \times 24 / 3000 - 2 \times 12 / 3000 = 0,008; \\ \epsilon_{B \text{ ПОИНКС}} &= 0,35 (35\%); \\ N_{T \text{ ПОИНКС}} &= 0,25 (0,35 / 0,008)^2 = 479. \end{aligned}$$

Тонкие паяные швы при теплосменах в основном работают на сдвиг, который характеризуется амплитудой угловой деформации $\Delta \gamma$. При циклическом кручении образцов припоя ПОС-61 в интервале 20... 135 °С с выдержкой под нагрузкой в течение 1 часа значения $\Delta \gamma$ и N_T попадают в одну область рассеяния, и формула, аппроксимирующая результаты испытаний, имеет вид:

$$\Delta \gamma \times N_T^{0,85} = 14. \quad (19)$$

Расчет угловых деформаций по амплитуде сдвига дает:

$$\Delta \gamma_{\text{ПОС-61}} = 0,037; \Delta \gamma_{\text{ПОИНКС}} = 0,073$$

или, согласно расчетам по формуле (18):

$$\Delta \gamma \cong 10 \times \epsilon_{II}. \quad (20)$$

При этом $N_{T \text{ ПОС-61}} = 1073$, $N_{T \text{ ПОИНКС}} = 486$, то есть практически соответствуют значениям, полученным по формуле (17).

Для пластичных (относительно) швов долговечность ПС можно определять по энергетическому критерию, учитывающему работу пластической деформации [6]:

$$\Delta \epsilon \sqrt{N_T} = \sqrt{\frac{a_p}{G}}, \quad (21)$$

где a_p — удельная работа деформации; G — модуль сдвига припоя.

Для ПОИНКС при $a_p = 12$ МПа, $G = 1200$, $\Delta \epsilon = 2 \times 28 / 11\,600 = 0,0048$ (в этом случае для расчета $\Delta \epsilon$ по (18) принимаются конструкционные характеристики припоя по табл. 1 (см. ТвЭП № 2 '2008, стр. 47, табл. 1, 3*)):

$$N_T = \frac{a_p}{G \times \Delta \epsilon^2} = \frac{12}{1200 (4,8 \times 10^{-3})^2} = 435.$$

Для хрупких припоев или хрупких ПС, когда пластичностью припоя можно пренебречь, N_T можно вычислять по формуле:

$$N_T^{0,12} \times \Delta \epsilon = 3,5 (\sigma_\delta / E). \quad (22)$$

Следует отметить, что 90% повреждений накапливается при максимальной температуре цикла, при которой основное значение имеет выдержка при T_{max} , то есть повреждения вызваны не только усталостью, но и ползучестью.

Долговечность N ПС можно рассчитать по реальной кинетике разрушения шва. Процесс разделяют на 2 стадии: фазу зарождения первой трещины и фазу ее распространения. При этом можно оценить критическую длину трещины, которая вызывает разрушение в конкретном случае:

$$L_{TP} = k (N - N_T), \quad (23)$$

где k — коэффициент, характеризующий скорость распространения длины трещины — L_{TP} , приблизительно равный для пластичных припоев 0,008–0,01. Долговечность ПС определяется по формуле:

$$N = \ell / k + N_T, \quad (24)$$

где ℓ — длина нахлестки.

Например, пользуясь расчетными данными N_T , можно оценить минимальную надежность ПС на печатной плате, выполненного припоем ПОС-61. Так, для планарного вывода МС толщиной $t = 0,4$ мм оптимальная длина нахлестки $\ell = 5 \times t = 5 \times 0,4 = 2$ мм.

$$N_{\text{min}} = \ell / k + N_T = 2 / 0,01 + 1140 = 1340.$$

Разумеется, увеличение ℓ влечет за собой увеличение N против N_{min} , но достоверность результатов при этом снижается.

В завершение к столь длительному повествованию хотелось представить читателю весьма любопытную задачу — почему по предложенной автором геометрии шва, топологии КП и указанной величине поверхностного натяжения припоя $\sigma_{np} = 370$ дин/см имеет место самопроизвольное формирование паяного соединения и, в частности, величины зазора?

В плоском зазоре величина дополнительно лапласовского давления, создаваемого кривизной поверхности припоя в безгалтельном зазоре (для простоты кривизну галтели не рассматриваем) равна $\sigma_{np}/(\delta/2)$, где δ — величина зазора, а $\delta/2$ — радиус кривизны. Это давление должно уравновешивать гидростатическое давление объема припоя в зазоре плюс вес паяемого элемента P :

$$\frac{2\sigma_{np}}{\delta} = \frac{V_{np} \times \rho \times g}{S} + P, \quad (25)$$

где $S = b \times \ell$ — площадь спая, а $V_{np} = b \times \ell \times \delta$.

Тогда:

$$2\sigma_{np}/\delta = \delta \times \rho \times g + P. \quad (26)$$

Задача самопроизвольного формирования зазора сводится к решению квадратного уравнения:

$$\delta^2 \times \rho \times g + P \times \delta - 2\sigma_{np} = 0. \quad (27)$$

Для конденсатора 1206 весом 0,04 г на каждое нахлесточное паяное соединение приходится нагрузка 0,02 г.

При $\sigma_{np} = 370$ дин/см или 0,37 г (1 дин = 0,001 г) числовая формула (27) примет вид:

$$8,5 \times 981 \times \delta^2 + 0,02\delta - 0,74 = 0. \quad (28)$$

Пренебрегая значениями b и b^2 в формуле решения квадратного уравнения, рассчитаем значение δ :

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{-0,02 \pm \sqrt{0,02^2 + 4 \times 8339 \times 0,74}}{2 \times 8339} = \\ &= \frac{\sqrt{24\,683}}{16\,678} = \frac{157}{16\,678} = \\ &= 0,0094 \text{ см} = 0,094 \text{ мм} \approx 0,1 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Учитывая, что в решении уравнения (28) в подкоренном выражении и в знаменателе значимыми величинами являются только σ_{np} , ρ_{np} и g , то вес элементов до 50 г включительно не имеет практического значения для самопроизвольного формирования зазора. Крупногабаритные и моточные изделия, опирающиеся на собственные конструктивы и каркасы, нагрузку на паяное соединение не создают.

Заключение

1. Рассмотренные в статье физические принципы формирования ПС и предложенные топология КП и соотношения $d_g/d_{отв}$ в печатных платах позволяют при условии адекватного контроля указанных параметров получать качественные и равнопрочные по механическим характеристикам фольгированного диэлектрика ПС, не прибегая к дополнительным расчетам, за исключением специфических задач силовой и конструкционной электроники.
2. Числовые значения технологических параметров ПС при использовании припоев, отличных от поименованных в настоящей статье,

могут быть получены совершенно аналогичным образом с учетом физико-химических особенностей процесса пайки и физико-механических свойств самих припоев.

3. При проведении предварительных или корректирующих расчетов по предложенной в статье методологии величины физико-механических свойств припоя (см. ТвЭП № 2 '2008, стр. 47, табл. 1) следует использовать для оценки нижнего уровня прочности ПС и верхнего предела его деформационного ресурса. ■

Литература

1. Парфенов А. Н. Феноменологическая теория смачивания и растекания расплавов. В сб. международного семинара: «Пайка. Современные технологии, материалы, конструкции.» № 2, М.: ЦРДЗ, 2001.
2. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. М.: «Машиностроение», 1967, с. 23.
3. Парфенов А. Н. Справочник по пайке / Под ред. акад. И. Е. Петрунина. Гл. 4 «Низкотемпературные припои и флюсы.» Изд. 3-е. М.: Машиностроение, 2003.
4. Парфенова Л. В., Парфенов А. Н. и др. Прочность соединений при пайке двухфазными припоями // Сварочное производство. 1976. № 1.
5. Скопенко А. И., Махненко В. И., Пивторак Н. И. Упруго-пластические деформации в многослойных паяных соединениях полупроводниковых приборов при циклических теплосменах // Автоматическая сварка. 1974. № 3.
6. Кузнецов О. А., Погалов А. И. Прочность паяных соединений. М.: Машиностроение, 1987.