

К. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО

Украина, Одесский национальный политехнический университет
E-mail: aiefimen@gmail.com

Дата поступления в редакцию
27.04 2010 г.

Оппонент д. т. н. И. Ш. НЕВЛЮДОВ
(ХНУРЭ, г. Харьков)

КОНТАКТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕЧАТНЫХ УЗЛАХ, ВЫПОЛНЕННЫЕ МЕТОДОМ ПРОКОЛА ФОЛЬГИ

Приведено теоретическое обоснование возможности реализации, а также результаты экспериментальных исследований контактных соединений, выполненных методом прокола фольги.

В современном электронном приборостроении целесообразность использования технологии монтажа на поверхность уже давно не вызывает сомнений, однако и ей присущи определенные недостатки. Проблемы в значительной степени связаны с процессом пайки, при помощи которой образуются контактные соединения — это сложное и дорогостоящее оборудование, дорогая и объемная оснастка для каждого печатного узла, необходимость тестирования образованных контактов, которое значительно усложняется при использовании корпусов с матричным расположением выводов (BGA), необходимость использования бессвинцовых паяльных паст и покрытий.

Аналогичные причины привели к широкому распространению методов непаяного монтажа проводных электрических соединений [1] в связи с их эффективностью (технологичность, высокая производительность, надежность, экологическая чистота). Однако эти методы не являются универсальными, т. е. не могут использоваться для монтажа большинства электронных компонентов (ЭК). В первую очередь, это связано со значительными размерами выводов, а значит и контактных соединений, что в эпоху микроминиатюризации электронной аппаратуры (ЭА) является существенным недостатком.

Таким образом, существует проблема создания контактных соединений в электронных печатных узлах высокоэффективными и экологически безопасными методами, адаптированными к современным требованиям микроминиатюризации и развития ЭК.

Одним из направлений решения поставленной задачи является создание непаяного контактного соединения выводов ЭК с контактными площадками печатных плат (ПП).

Целью работы является теоретическое обоснование возможности практической реализации и экспериментальное исследование контактного соединения в электронных печатных узлах, выполненного методом прокола фольги (МПФ). При этом решаются ос-

новные задачи теоретических и экспериментальных исследований:

- описание МПФ и особенностей такого механизма образования контактного соединения;
- определение конструктивных параметров элементов контактного соединения, показывающих возможность использования метода в современной микроминиатюрной электронной аппаратуре;
- установление связи между усилиями запрессовки выводов при монтаже ЭК и прочностными показателями выводов;
- представление конструктивных моделей соединений МПФ, рассмотрение отдельных проблем их технической реализации и некоторых особенностей использования;
- проведение некоторых испытаний контактных соединений на возможность их эксплуатации.

Актуальность работы определяется возможностью получения непаяного контактного соединения, позволяющего вести монтаж ЭК на ПП автоматизированным методом без использования энергозатратных и экологически небезопасных процессов пайки, а также менее затратной подготовки производства.

Контактные соединения МПФ в электронных печатных узлах выполняются путем прокалывания выводами ЭК фольги контактных площадок ПП, под которыми расположены отверстия в диэлектрическом основании ПП (рис. 1). Собственно соединение образуется выводами ЭК, введенными в отверстия под контактными площадками, на стенки которых загибается часть фольги контактных площадок [2, 3].

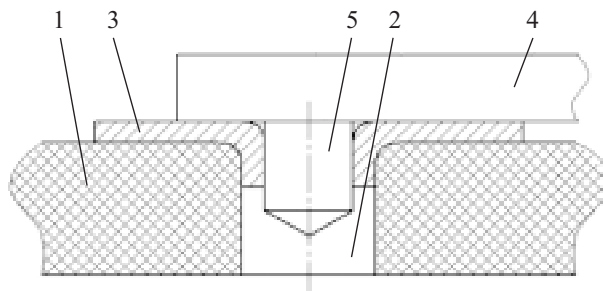


Рис. 1. Контактное соединение МПФ:
1 — основание печатной платы; 2 — отверстие; 3 — контактная площадка; 4 — электронный компонент; 5 — вывод электронного компонента

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МПФ

Рассмотрим механизм образования контакта МПФ.

На **рис. 2** представлена фотография контактного соединения, выполненного на макете печатного узла методом прокола фольги, а также печатной платы после демонтажа ЭК. Собственно контактные части дополнительно приведены в увеличенном масштабе.

Контактное соединение предполагает использование миниатюрных контактных выводов ЭК. Минимальное сечение вывода определяется требуемой прочностью, связанной с величиной усилия прокола фольги и его запрессовкой и, конечно же, с получением надежного во времени и в условиях действия дестабилизирующих факторов контакта с допустимыми значениями переходного сопротивления.

Конструкция такого контактного соединения достаточно технологична за счет использования выводов с простой формой поперечного сечения, простым конструктивным решением контактных элементов на печатной плате. Надежность соединения определяется значительной площадью контакта вывода с фольгой контактной площадки и плотным их прилеганием за счет прессовой посадки и холодной деформации в месте контактирования.

Механизм образования контакта МПФ, на первый взгляд, подобен механизму метода «press-fit» [1; 4, с. 178—192], однако последний предполагает использование выводов-штырей с упругими элементами, которые должны обеспечить требуемое давление при контактировании со стенками металлизированного отверстия, компенсируя производственные погрешности размеров элементов соединения штырей и отверстий и усадку, вызванную явлением релаксации материала основания платы (материал «плывет», ослабляя первоначально тугое соединение штырей с

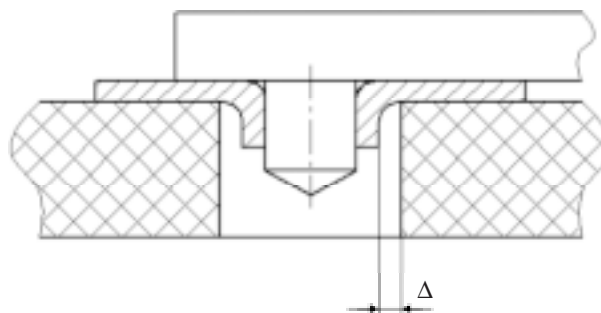


Рис. 3. Контактное соединение МПФ (Δ — возможный зазор за счет релаксации материала основания платы)

металлизированными отверстиями). С другой стороны, эти упругие элементы выводов должны ограничивать усилие запрессовки штырей в отверстия с тем, чтобы предотвратить разрушение слоя металлизации в отверстии.

Эти требования к конструкции штырей противостоят возможности уменьшения их размера и, соответственно, микроминиатюризации ЭК.

В предлагаемой конструкции механизм образования контактного соединения имеет следующую особенность — вывод-штырь должен образовывать контакт не с жестко расположенной стенкой металлизированного отверстия, а с подвижным элементом — отбортованной после прокола фольгой. Поэтому достаточно изначально создать условия обеспечения пластической деформации (холодной сварки) в области контактирования вывода и фольги, а релаксация материала основания платы не имеет принципиального значения (**рис. 3**).

С позиций технологичности конструкции соединения более всего подходит простая форма поперечного сечения вывода — круглая или квадратная. Что

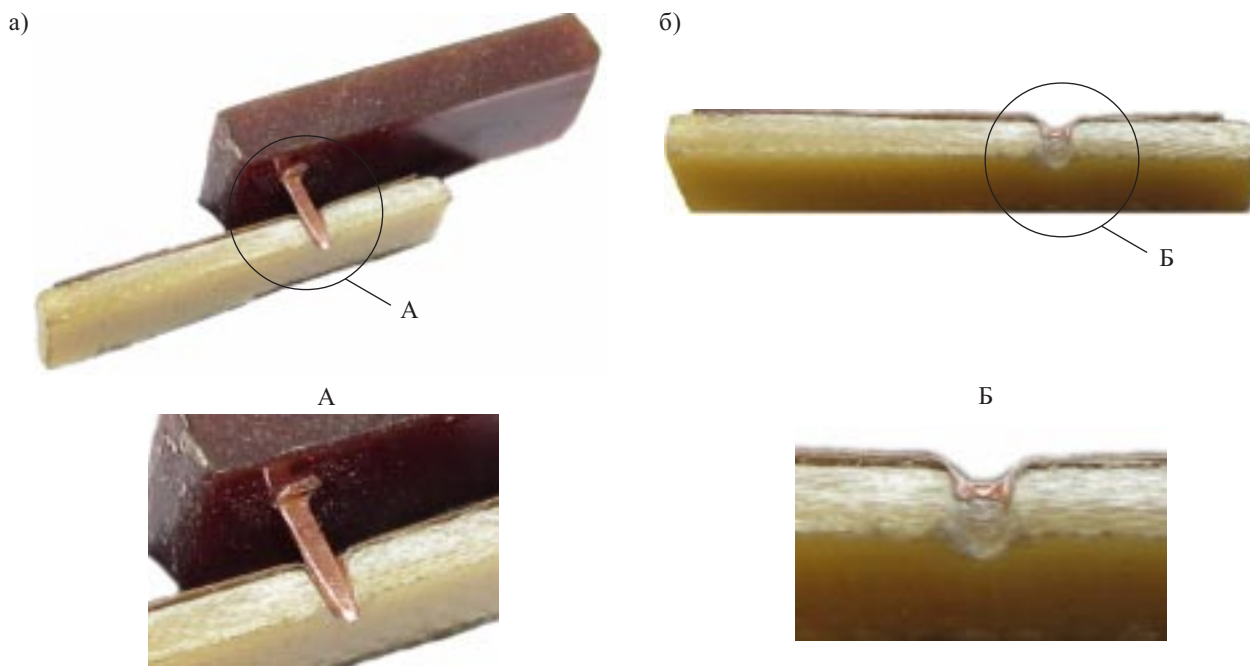


Рис. 2. Поперечное сечение контактного соединения МПФ (а) и печатной платы после демонтажа ЭК (б)

же касается условия обеспечения пластической деформации с одновременным ограничением усилия запрессовки, то ему лучше удовлетворяет квадратная форма вывода. Конечно же, можно применять выводы и другой формы поперечного сечения, однако в настоящей статье они не рассматриваются.

Определение конструктивных параметров ПП и выводов ЭК

Таковыми основными параметрами являются:

- шаг контактных площадок на ПП и выводов электронных компонентов;
- диаметр отверстий, который определяется диаметром выводов электронных компонентов;
- длина выводов электронных компонентов.

Значения этих параметров взаимосвязаны между собой и, в свою очередь, зависят от размеров корпусов ЭК и количества выводов на них, величины токов и напряжений, которые действуют в цепях ЭК, характеристик материалов ПП и выводов ЭК, конструкции корпусов ЭК, класса точности ПП и др.

С точки зрения реализации монтажа МПФ можно говорить о целесообразности его использования для различных ЭК — от ИМС с высокой степенью интеграции для микроминиатюрной электронной аппаратуры до компонентов силовой электроники. Очевидно, что именно для микроминиатюрной аппаратуры условия реализации МПФ самые сложные, а именно — минимальный шаг расположения выводов в сочетании с необходимостью приложения механического усилия, в том числе на вывод. Это может существенно ограничивать использование метода.

В силу сказанного для микроминиатюрной аппаратуры целесообразно определять конструктивные параметры ПП и ЭК исходя из минимально возможного шага выводов ЭК, который может быть реализован при условии минимизации диаметра выводов. Минимальный диаметр выводов ограничивается их прочностными характеристиками, которые зависят от материала выводов и их длины. Необходимо также учитывать и форму сечения выводов, и не только с точки зрения прочностных характеристик, но и, в первую очередь, создания надежного контактного соединения.

Определение формы и размеров сечения выводов проводилось на основании ранее проведенного анализа. В качестве наиболее технологичной формы поперечного сечения вывода выбираем квадрат. Исходя из предположений обеспечения прочности на первом этапе итерации выбираем диаметр его описанной окружности — 0,2 мм.

Расчеты минимального шага расположения выводов ЭК и контактных площадок на ПП выполняются для многослойной печатной платы 5-го класса точности для трех случаев:

- без возможности прокладки проводников между контактными площадками;
- с возможностью прокладки одного проводника между контактными площадками;
- для матричного расположения выводов (корпуса BGA).

В такой же последовательности произведем расчеты.

1. Наименьшее номинальное расстояние l между центрами двух контактных площадок (отверстий) определяется по формуле [5]

$$l = \frac{D_1 + D_2}{2} + S, \quad (1)$$

где D_1 и D_2 — диаметры рядом расположенных контактных площадок;
 S — зазор между контактными площадками.

Принимаем $D_1 = D_2 = D$, который рассчитываем по формуле

$$D = (d + \Delta d_{\text{во}}) + 2b + \Delta t_{\text{во}} + 2\Delta d_{\text{тр}} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{но}}^2)^{1/2} \quad (2)$$

где d — номинальный диаметр отверстия;
 $\Delta d_{\text{во}}$ — верхнее предельное отклонение диаметра отверстия;
 b — гарантийный пояс;
 $\Delta t_{\text{во}}$ — верхнее предельное отклонение диаметра контактной площадки;
 $\Delta d_{\text{тр}}$ — величина подтравливания диэлектрика в отверстии (для предлагаемой технологии $\Delta d_{\text{тр}} = 0$);
 T_d — позиционный допуск расположения оси отверстия;
 T_D — позиционный допуск расположения центра контактной площадки;
 $\Delta t_{\text{но}}$ — нижнее предельное отклонение диаметра контактной площадки.

Поскольку номинальный диаметр отверстия для монтажа МПФ должен быть приблизительно равен номинальному диаметру вывода, в нашем случае $d = 0,2$ мм.

Значения остальных составляющих выбираем из [5], и тогда из (2) получим

$$D = 0,2 + 2 \cdot 0,025 + 0,03 + (0,1^2 + 0,15^2 + 0,03^2)^{1/2} = 0,46 \text{ мм.}$$

Подставляя в формулу (1) полученное значение D и значение S из [5], получим

$$l = 0,46 + 0,10 = 0,56 \text{ мм.}$$

Учитывая, что стандартный шаг расположения выводов и контактных площадок составляет 0,5 мм, можно сделать вывод о том, что при незначительном уменьшении сечения выводов и повышении точности изготовления ПП можно получить $l = 0,5$ мм.

2. Наименьшее номинальное расстояние l между центрами двух контактных площадок (отверстий) с учетом возможности прокладки между ними одного проводника определяется по формуле

$$l = \frac{D_1 + D_2}{2} + t \cdot n + S(n + 1) + T_l, \quad (3)$$

где n — количество печатных проводников;
 t — номинальное значение ширины проводника;
 T_l — позиционный допуск расположения проводника.

Подставляя в формулу (3) ранее полученное значение D и значения других параметров из [5], получим

$$l = 0,46 + 0,1 + 2 \cdot 0,1 + 0,02 = 0,78 \text{ мм.}$$

3. Минимальный шаг расположения выводов при их матричном расположении определим с учетом

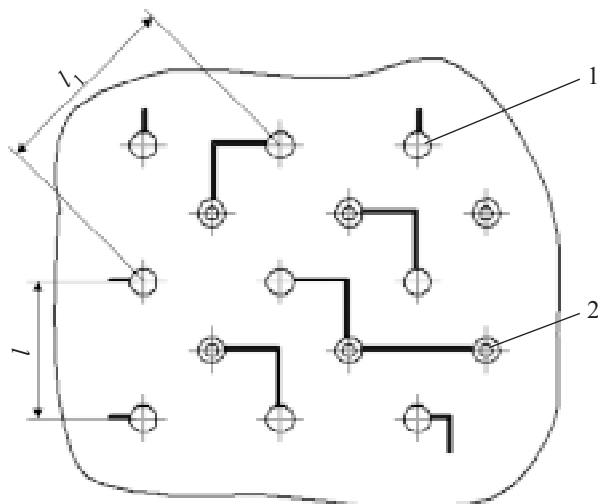


Рис. 4. Матричное расположение контактных площадок под выводы ЭК (1) и переходных металлизированных отверстий (2) на ПП

необходимости иметь переходные отверстия, которые в общем случае также имеют матричное расположение (рис. 4).

Диаметр контактной площадки переходного металлизированного отверстия $D_{по}$ по рекомендациям, приведенным в [6], составляет 20—25 мил (0,51—0,64 мм). Размер по диагонали между центрами контактных площадок под выводы ЭК равен

$$l_1 = D + D_{по} + 2S = 0,46 + 0,64 + 2 \cdot 0,10 = 1,3 \text{ мм.}$$

Исходя из этого, минимальный размер l , соответствующий минимальному шагу расположения выводов ЭК (контактных площадок под выводы ЭК), равен 0,92 мм.

Это дает основание выбрать шаг расположения выводов 1,0 мм, применяемый для типовых корпусов BGA [6].

Определение длины выводов ЭК

Длина выводов ЭК должна быть минимальной, чтобы удовлетворялись условия прочности и минимизации влияния выводов на условия трассировки ПП. Но при этом необходимо обеспечить надежный электрический контакт вывода с контактной площадкой ПП.

Рассмотрим условия контактирования на графической модели элементов контактного соединения (рис. 5) до запрессовки.

Минимальная длина вывода определяется следующим образом:

$$l_b = l_k + l_3 + \Delta k + \Delta n, \tag{4}$$

где l_k — минимальная длина контактирования вывода с фольгой контактной площадки печатной платы;

l_3 — длина заострения выводов.

Величина l_k ограничивается длиной фольги, которая загибается внутрь отверстия после ее разрыва выводом во время монтажа. Так, для монтажного отверстия $\varnothing 0,2 \text{ мм}$ $l_k = 0,1 \text{ мм}$, для отверстия $\varnothing 0,5 \text{ мм}$ $l_k = 0,25 \text{ мм}$.

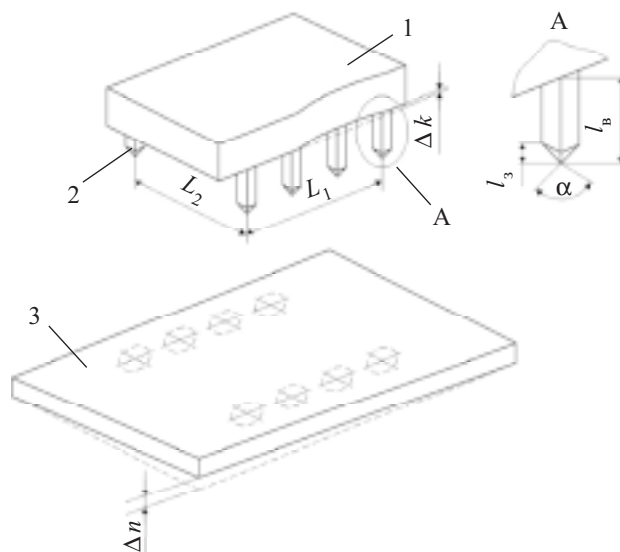


Рис. 5. Элементы контактного соединения:

1 — электронный компонент; 2 — вывод ЭК; 3 — печатная плата; α — угол заострения вывода; Δn — величина стрелы прогиба и коробления печатной платы; Δk — отклонение основания корпуса ЭК от плоскостности

Величины Δn и Δk определяют неплотность прилегания корпуса ЭК к печатной плате.

Величина коробления печатной платы является параметром материала ПП и зависит от деформации в процессе изготовления печатных плат [7].

Угол заострения вывода α определяет усилие прокола фольги. С уменьшением угла α снижается усилие прокола, но увеличивается длина вывода за счет увеличения длины заострения l_3 , причем с увеличением диаметра вывода l_3 также растет.

Таким образом, минимальная длина вывода зависит не только от составляющих выражения (4), но и является функцией размеров ЭК (L_1, L_2) и, соответственно, размеров участка печатной платы, на который монтируется ЭК.

Для оценки практической возможности реализации МПФ определим минимальную длину вывода при предельных (на сегодняшний день) размерах ЭК и при средних значениях диаметра описанной окружности поперечного сечения вывода.

Исходные данные для расчета следующие:

- диаметр описанной окружности поперечного сечения вывода — 0,5 мм;
- угол $\alpha = 90^\circ$, тогда $l_3 = 0,25 \text{ мм}$;
- величина стрелы прогиба и коробления печатной платы Δn ;
- минимальная длина контактирования $l_k = 0,25 \text{ мм}$.

Для стеклотекстолита фольгированного по ГОСТ 10316-78 принимаем значение $\Delta n = 11 \text{ мм}$ на длине 1000 мм. Если считать максимальные размеры L_1 и L_2 равными примерно 40 мм (это корпус PLCC-124), то на этой длине $\Delta n = 0,44 \text{ мм}$;

Что касается отклонения основания корпуса ЭК от плоскостности Δk , данные по этому параметру отсутствуют, но можно предположить, что его величина незначительна и находится в пределах допуска длины вывода.

Расчетные значения $P_{кр}$ для выводов длиной 1 мм из различных материалов

D, мм	a, мм	Бронза фосфористая катаная		Латунь холоднотянутая		Медь холоднотянутая прокатная		Сталь углеродистая и хромоникелевая	
		E, кгс/мм ²	$P_{кр}$, кгс	E, кгс/мм ²	$P_{кр}$, кгс	E, кгс/мм ²	$P_{кр}$, кгс	E, кгс/мм ²	$P_{кр}$, кгс
0,2	0,14	11500	0,91	9500	0,75	12000	0,95	20500	1,62
0,3	0,21		4,6		3,8		4,8		8,2
0,4	0,28		14,5		12,0		15,1		25,9
0,5	0,35		35,5		29,3		37,1		63,3
0,6	0,42		73,5		60,7		76,7		131
0,7	0,49		136		113		142		242
0,8	0,57		249		206		260		444

Отсюда можем определить минимальную длину вывода

$$l_{в} = 0,25 + 0,25 + 0,44 = 0,94 \text{ мм.}$$

Этот расчет проведен, можно сказать, для предельного случая. При меньших размерах корпусов ЭК и, соответственно, диаметре выводов, длина вывода может быть меньше. Но даже для приведенного случая длина вывода может удовлетворить предъявленные требования. Однако окончательное заключение можно сделать после анализа механической прочности вывода, которая также зависит от его длины.

Определим минимальный диаметр описанной окружности D поперечного сечения вывода, т. к. в дальнейшем при конструировании ПП его удобно сравнивать с диаметром отверстия.

С точки зрения микроминиатюризации ЭА поперечное сечение выводов следует минимизировать. Однако тут есть существенное ограничение — прочность. Вывод не должен изгибаться при приложении значительных усилий в процессе запрессовки. Следует также учитывать технологичность изготовления выводов и корпусов ЭК.

Первое ограничение можно определить с помощью известной задачи Эйлера [8], второе ограничение определяется уровнем развития технологии на современном этапе.

Рассмотрим решение задачи Эйлера для вывода (стержня) с площадью поперечного сечения F, сжи-

маемого продольной силой P, линия действия которой совпадает с геометрической осью вывода (рис. 6).

Для условий задачи, когда один конец стержня (А) заземлен, а другой (Б) свободен, формула для определения критической силы (формула Эйлера) имеет вид

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{мин}}{(\mu l)^2};$$

$$J_{мин} = a^4/12,$$

где E — модуль упругости материала вывода;

$J_{мин}$ — осевой момент инерции, для вывода квадратного сечения со стороной квадрата a;

μ — коэффициент, характеризующий условия закрепления концов стержня, в рассматриваемом случае $\mu=2$;

l — длина вывода, для принятых выше обозначений $l=l_{в}$.

Критической силой называется нагрузка, при которой начальное равновесие перестает быть устойчивым, т. е. при действии в этом положении небольшой поперечной силы либо каких-либо других факторов (эксцентricность приложения силы P, первоначальный прогиб вывода, неоднородность его материала и др.) появляется непрерывно увеличивающийся прогиб вывода. Следует также учитывать, что после устранения причины, вызвавшей прогиб (в том числе и после снятия нагрузки P), вывод не возвращается в первоначальное прямолинейное положение и остается изогнутым [8].

Из этого следует, что должно выполняться условие

$$P < P_{кр}, \tag{5}$$

где P — сила, необходимая для запрессовки вывода.

В таблице 1 приведены результаты расчетов $P_{кр}$ для выводов длиной 1 мм из наиболее подходящих материалов с различными размерами поперечного сечения a.

Усилие P запрессовки выводов контактного соединения МПФ определим экспериментально, после чего можно будет проверить выполнение (5).

Конструктивные модели соединений МПФ

По конструктивному исполнению печатные платы, которые могут использоваться для монтажа ЭК методом прокола фольги, принципиально не отличаются от существующих плат для монтажа в отвер-

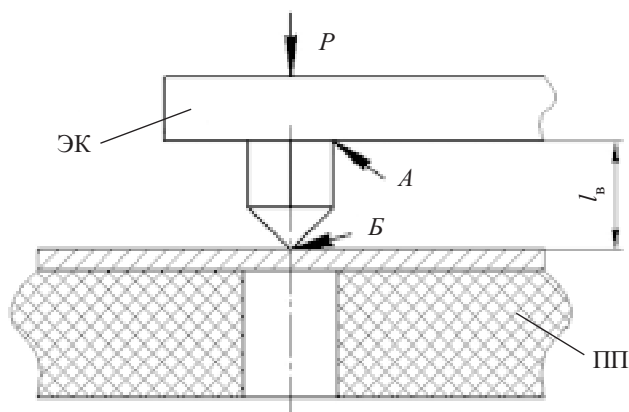


Рис. 6. Иллюстрация к определению критической силы при запрессовке вывода

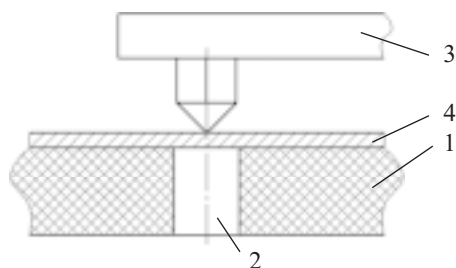


Рис. 7. Односторонняя печатная плата

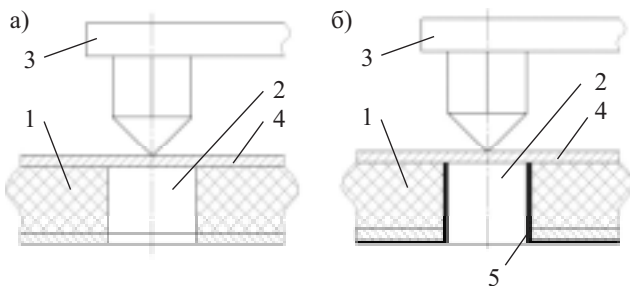


Рис. 8. Двусторонняя печатная плата:

a — без металлизации; *б* — с металлизацией монтажных отверстий

ствия и на поверхность. Их особенностью является то, что отверстия должны быть глухими («слепыми») и могут быть скрытыми («погребенными»), а для микроминиатюрных ЭК — еще и малого диаметра.

На рис. 7—9 представлены некоторые возможные варианты конструкции печатных плат для монтажа МПФ. Здесь обозначено: 1 — основание ПП; 2 — монтажное отверстие; 3 — электронный компонент; 4 — фольга; 5 — слой металлизации; 6 — прокладка.

Остановимся на некоторых вопросах возможности выполнения глухих и скрытых отверстий и их технологичности.

Существует вариант технологического процесса изготовления глухих и скрытых отверстий, при котором производится сверление отверстий на заданную глубину с последующей металлизацией [9].

В случае многослойных печатных плат эти операции могут осуществляться как после прессования слоев (рис. 9, б), так и до прессования платы в целом применительно к промежуточным частям или полупакетам (рис. 9, г).

Требования микроминиатюризации ЭС повлекли за собой использование микроотверстий в ПП. Механическим сверлением легко выполняются отверстия диаметром не менее 150 мкм. Отверстия диаметром 100 мкм и менее эффективней формировать с использованием лазерной технологии.

Развитие лазерной технологии привело к возможности формирования отверстий двойным лазером. Это позволяет получать отверстия любых заданных размеров в диапазоне от 25 до 250 мкм [10]. Однако механическое сверление как метод формирования отверстий еще доминирует в производстве ПП. Такое положение сохраняется благодаря развитию производства микросверл и использованию свер-

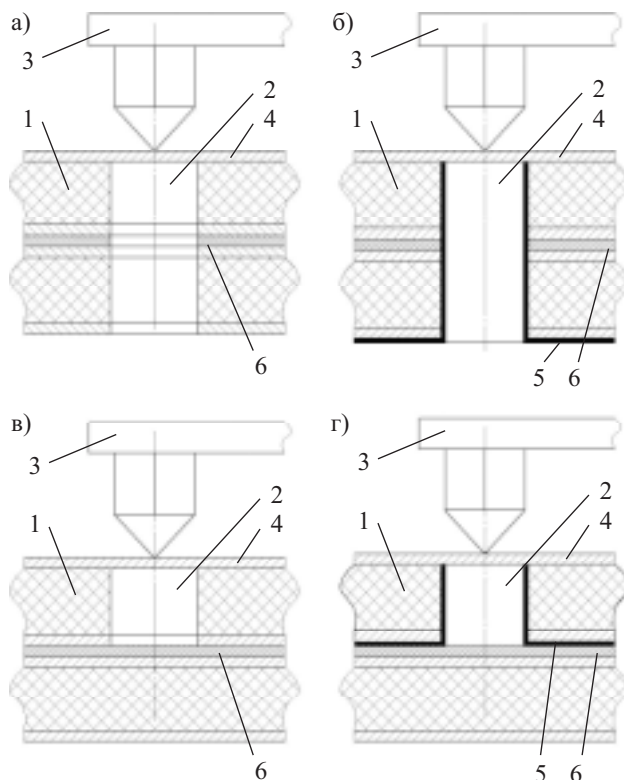


Рис. 9. Многослойная печатная плата с глухими (*a*, *б*) и скрытыми (*в*, *г*) монтажными отверстиями:

a, *в* — без металлизации; *б*, *г* — с металлизацией монтажных отверстий

льных станков с высокой скоростью шпинделей (до 350 тыс. об/мин).

На сегодняшний день механическим сверлением можно достичь высокого качества отверстий диаметром 50 мкм, а несколько фирм-производителей разработали и сверла ультрамалого диаметра — 20 мкм. Тем не менее, некоторые специалисты считают, что при сверлении глухих отверстий малых диаметров механическое сверление все же не составляет серьезной конкуренции лазерному из-за трудностей управления глубиной сверления [11].

Однако следует отметить, что технологии изготовления ПП развиваются очень быстрыми темпами, это касается также и обеспечения точности заглубления отверстий. До недавнего времени она составляла ± 50 мкм, что явно недостаточно для микроотверстий. Новая система управления на основе использования датчика электрического поля может обеспечить точность заглубления отверстия ± 5 мкм при том, что она позволяет выполнять четко сформированные отверстия диаметром до 100 мкм с прямоугольным дном [12].

Таким образом, можно утверждать, что изготовление печатных плат для монтажа МПФ основывается на современных технологиях и особенности, связанные с формированием отверстий, выражаются в том, что лазерное и механическое сверление не заменяют друг друга, а дополняют.

Кроме того, технология выполнения контактных соединений методом прокола фольги в электронных печатных узлах рассчитана на использование перспективных ЭК, имеющих штыри-выводы.

В связи с тем, что используются ПП без видимых отверстий со стороны установки ЭК, монтаж компонентов должен производиться автоматизированным методом, аналогичным поверхностному монтажу компонентов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТАКТНОГО СОЕДИНЕНИЯ МПФ

Критерием качества контактного соединения может служить контактное сопротивление, которое является основной характеристикой любого контакта.

Исследования контактного соединения, выполненного МПФ, проводились на тест-плате, эскиз которой представлен на рис. 10.

Тест-плата состоит из двух печатных плат — верхней, на которой выполнены четыре паяных соединения выводов с контактными площадками, и нижней с четырьмя контактными соединениями МПФ выводов с контактными площадками.

Платы 1 и 2 механически скреплены между собой двумя самонарезающими винтами 3 диаметром 2 мм.

Отверстия в нижней плате под соединение МПФ имеют диаметр 0,6 мм. Поперечное сечение выводов близко к квадратному с диаметром описанной окружности около 0,6 мм.

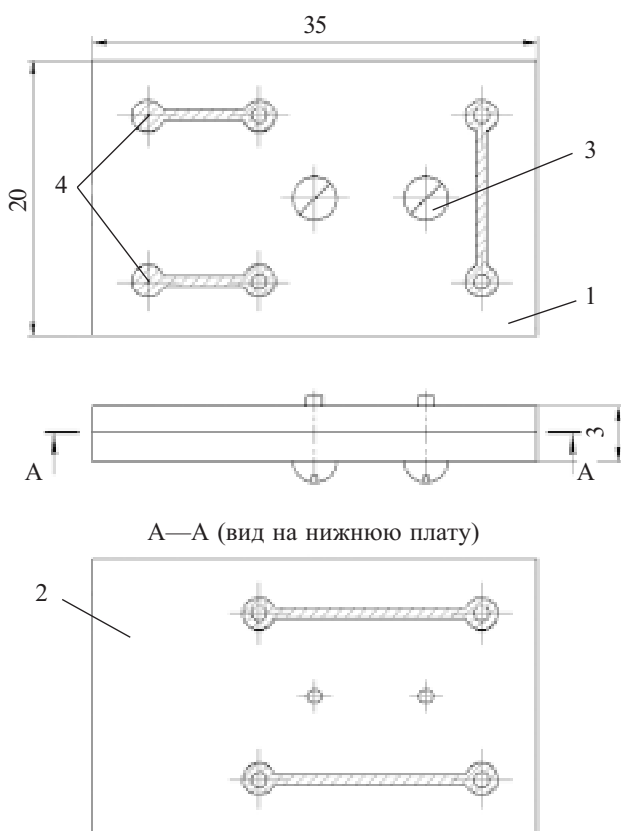


Рис. 10. Тест-плата:

1 — верхняя ПП; 2 — нижняя ПП; 3 — винт; 4 — контактные площадки для измерений

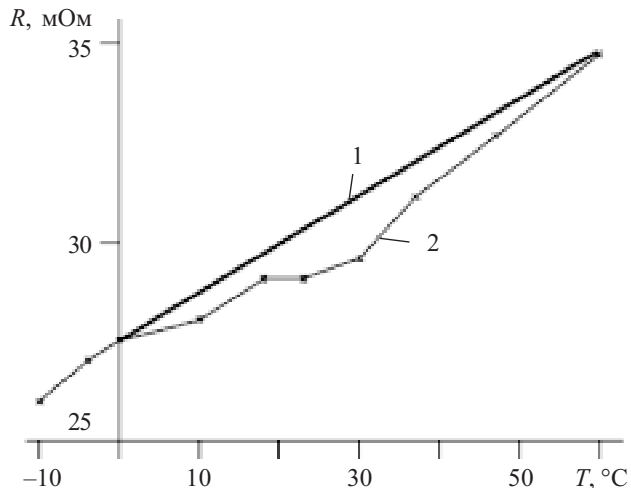


Рис. 11. Зависимость сопротивления токопроводящей части тест-платы от температуры:
1 — расчетная; 2 — экспериментальная

Толщина фольги печатных плат равна 35 мкм. Для измерения сопротивления токопроводящей части тест-платы используются контактные площадки 4. Измерение сопротивления проводилось микроомметром Ф4104.

В нормальных условиях сопротивление между контактными площадками 4 равно 29 мОм. Если вычесть отсюда сопротивление соединительных печатных проводников, то суммарное контактное сопротивление вывода с контактной площадкой платы 1 (паяное) и контактной площадкой платы 2 (МПФ) составит около 4 мОм (для сравнения — допустимое контактное сопротивление контактных пар электрических соединителей составляет 10—20 мОм).

Были проведены *испытания тест-платы на воздействие температуры*. Экспериментальные значения сопротивления всей токопроводящей части тест-платы при различной температуре представлены кривой 2 на рис. 11.

Анализ полученной зависимости сопротивления токопроводящей части тест-платы от температуры дает основание предположить, что изменение сопротивления вызвано свойством материала проводников и выводов изменять сопротивление при изменении температуры в соответствии с формулой

$$R_T = R_0 + R_0 \alpha \Delta t,$$

где R_T — сопротивление при температуре T ;

R_0 — сопротивление при определенной температуре T_0 , например при 0°C ;

α — температурный коэффициент электрического сопротивления проводника (для меди $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

Δt — разность температур, $\Delta t = T - T_0$.

Приведенная на рис. 11 расчетная зависимость подтверждает предположение о том, что изменение сопротивления токопроводящей части тест-платы вызвано физическими свойствами материала проводников, а отклонение экспериментальной зависимости от расчетной объясняется погрешностями измерений.

В свою очередь, экспериментальные результаты говорят об относительной стабильности контактного

сопротивления тест-платы в рассматриваемом диапазоне температур.

Также исследовалось *воздействие на тест-плату смены температуры* (термоциклирование). Были проведены 3 цикла испытаний, при которых плата выдерживалась по 20 мин поочередно при температуре -10 и $+70^{\circ}\text{C}$. После испытаний сопротивление токопроводящей части тест-платы составило 29 мОм при нормальной температуре, что соответствует его величине в начале испытаний.

Испытание на воздействие агрессивной среды проводилось в соляном (NaCl) и щелочном (NaHCO_3) растворе в течение одного часа при температуре около 100°C (кипячение). Величина измеренного затем сопротивления составила 27 мОм при нормальной температуре. Полученное отклонение от первоначального значения сопротивления можно объяснить погрешностью микрометра, которая равна $\pm 2,5\%$ от конечного значения диапазона измерения (100 мОм).

При испытаниях на механическое воздействие тест-плату подвергали воздействию одиночных ударов с ускорением (30—40)g. Было произведено по 5 ударов в двух направлениях — параллельно и перпендикулярно выводам платы.

После испытаний сопротивление составило 29,5 мОм при нормальной температуре.

Для определения *усилия прокалывания фольги и запрессовки выводов в отверстие печатной платы* были проведены определительные испытания на приспособлении, схематически показанном на **рис. 12**.

Испытания по определению усилия прокалывания фольги проводились по 6 раз для выводов разных диаметров. В качестве выводов использовались штыри круглого сечения. На печатных платах использовалась медная фольга толщиной 35 мкм.

Результаты испытаний приведены в **табл. 2**.

Из-за существенной разницы в диаметрах вывода и отверстия (свободная посадка) в полученных результатах не учитывалось влияние отверстия на усилие запрессовки вывода. В связи с этим были прове-

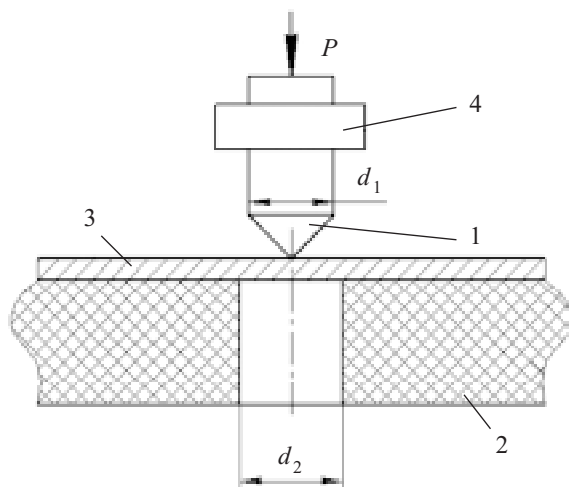


Рис. 12. Приспособление для проведения испытаний: 1 — вывод; 2 — основание печатной платы; 3 — фольга; 4 — динамометр

Таблица 2

Усредненные значения усилия прокалывания фольги выводами различного диаметра

Диаметр вывода d_1 , мм	Диаметр отверстия d_2 , мм	Усилие прокалывания P , кгс
0,2*	—	0,22
0,3	0,4	0,26
0,4	0,5	0,29
0,5	0,6	0,33
0,6	0,7	0,38
0,7	0,8	0,42
0,8	0,9	0,47

* Для этого диаметра значение P было получено методом прогнозирования.

дены испытания для разных соотношений диаметров вывода и отверстия. В **табл. 3** приведены результаты определения усилия запрессовки выводов разного диаметра в отверстие диаметром 0,6 мм.

Таким образом, для прессовой посадки и создания условий для холодной сварки вывода с фольгой необходимо приложить усилие, которое примерно в 2 раза больше усилия прокалывания фольги.

Основываясь на полученных экспериментально значениях усилия запрессовки P (табл. 2) и расчет-

Таблица 3

Усредненные значения усилия запрессовки выводов различного диаметра в отверстие диаметром $d_2=0,6$ мм

Диаметр вывода d_1 , мм	Усилие запрессовки P , кгс
0,55	0,38
0,56	0,39
0,57	0,59
0,58	0,71

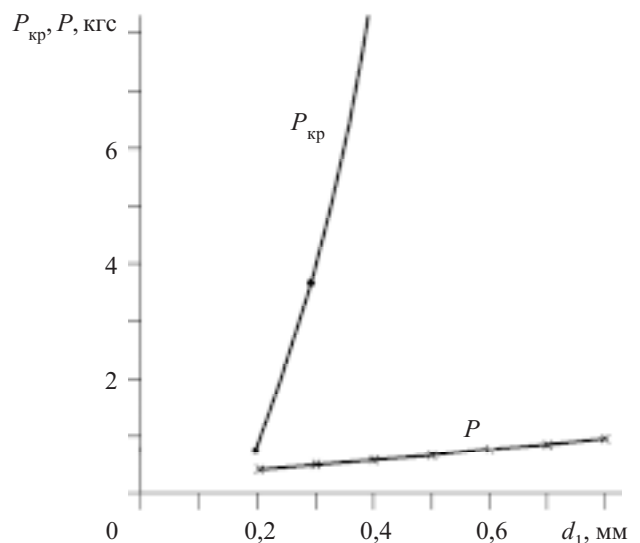


Рис. 13. Зависимость усилия запрессовки P и критической силы $P_{кр}$ от диаметра выводов

ных значениях критической силы $P_{кр}$, вызывающей прогиб вывода (табл. 1), получим зависимости, которые позволяют их сравнить (рис. 13).

Зависимость $P_{кр}$ приведена для латуни холодной, имеющей наименьшее значение модуля упругости из всех рассматриваемых материалов.

Зависимость P построена для удвоенных значений P , приведенных в табл. 2.

Анализ зависимостей позволяет говорить о том, что с точки зрения прочностных показателей выводов контактные соединения МПФ могут быть реализованы. При этом следует отметить, что метод имеет значительные резервы — для выводов диаметром начиная с 0,3 мм и выше выполняется условие $P_{кр} \gg P$. Также очевидно, что усилие запрессовки вывода квадратного сечения будет меньше, чем усилие запрессовки вывода круглого сечения с одинаковыми диаметрами соответственно описанной окружности и круга за счет меньшей площади соприкосновения поверхности вывода с поверхностью отверстия.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ДАННОМ НАПРАВЛЕНИИ

Промышленное освоение монтажа МПФ требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований и опытно-конструкторских работ, детального изучения физико-механических особенностей формирования контактного соединения с тем, чтобы получить оптимальные конструктивные, технологические и экономические показатели электронной аппаратуры. И в этом направлении целесообразным представляется формальное описание поставленной задачи для дальнейшего ее решения.

На основании проведенных исследований предлагается математическая постановка задачи выбора и оптимизации структуры и параметров конструкции контактных соединений МПФ с учетом технологических и экономических показателей. В качестве целевой функции выберем функциональную зависимость контактного сопротивления соединения, выполненного МПФ, от его структуры и конструктивных параметров.

Требуется найти такой вектор \vec{K} структурных и геометрических параметров контактных соединений МПФ, чтобы $R(\vec{K}) \rightarrow \min$ с учетом ряда ограничений на структуру, материалы, конструктивные размеры, форму, покрытия, шероховатость, технологичность (усилие запрессовки выводов и т. д.). Необходимо включить в ограничения также группу параметров и показателей качества, которые характеризуют надежное функционирование электрических соединений и аппаратуры в целом: токовую нагрузку, тепловой режим, электромагнитную совместимость, стойкость к действию внешних дестабилизирующих факторов и др.

Тогда

$$\vec{K} = \bigcup_{i=1}^n \vec{K}_i, \quad \vec{K}_i = \{D_i, L_i, G_i, T_i, S_i\}, \quad i \in [1, n],$$

где D_i — множество диаметров выводов и отверстий на ПП;

L_i — множество размеров выводов ЭК, определяющих сопряжение с отверстиями;

G_i — множество форм выводов;

T_i — множество типов монтажных отверстий на ПП (с металлизацией, без металлизации, сквозных, глухих и др.);

S_i — множество типов покрытий.

Такая математическая постановка задачи создания оптимальных конструкций контактных соединений МПФ позволяет ориентироваться на ее алгоритмическую реализацию и использование средств вычислительной техники.

ВЫВОДЫ

В результате выполненной работы были определены конструктивные параметры ПП и выводов ЭК под монтаж МПФ с позиций их минимизации и, соответственно, микроминиатюризации ЭА.

Приведенные расчеты определяют возможность проектирования ПП пятого класса точности с шагом расположения выводов ЭК до 0,5 мм с использованием реально существующих технологических процессов.

Теоретические и экспериментальные исследования контактных соединений с учетом воздействия ряда климатических и механических факторов, а также измерения прочностных показателей выводов ЭК для обеспечения их запрессовки могут служить основанием для дальнейших исследований МПФ с целью более детального изучения физико-механических особенностей формирования собственно контактного соединения и определения технико-экономической целесообразности практического применения метода в электронных печатных узлах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ефименко А. А., Собченко Д. Л. Непамяные контактные соединения в электронных печатных узлах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2009.— № 3.— С. 3—9.
2. Патент 86381 України. Контактне з'єднання на друкованій платі / А. А. Єфіменко.— 2009.— Бюл. № 8.
3. Ефименко А. А., Собченко Д. Л. Определение конструктивных параметров контактных соединений МПФ // Тр. 9-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ».— Одесса.— 2008.— Т. II.— С. 88.
4. Медведев А. М. Сборка и монтаж электронных устройств.— М.: Техносфера, 2007.
5. ГОСТ 23751-86. Платы печатные. Основные параметры конструкции.
6. Паллием В. Проектируем платы с BGA // Печатный монтаж.— 2008.— № 2— С. 34—37; № 3.— С. 38—40.
7. Бегер Е. Предупреждение деформации печатных плат на этапе конструирования // Chip news. Инженерная микроэлектроника.— 2008.— № 10—11.— С. 44—48.
8. Заблонский К. И., Беляев М. С., Телис И. Я. и др. Проектирование механизмов и приборов.— К.: Вища школа, 1971.
9. Чернышов А. Рекомендации по применению различных типов глухих и скрытых отверстий // Печатный монтаж.— 2009.— № 2—3.— С. 32—35.
10. Никируй В. Лазерные технологии в производстве печатных плат и не только // Печатный монтаж.— 2009.— № 2—3.— С. 25—28.
11. Джианг К., Лианю Ф., Жефенг Д. Механическое сверление печатных плат // Печатный монтаж.— 2007.— № 2.— С. 22—24.
12. Иванова А., Медведев А. Механическое и лазерное формирование отверстий // Печатный монтаж.— 2008.— № 1.— С. 2—7.