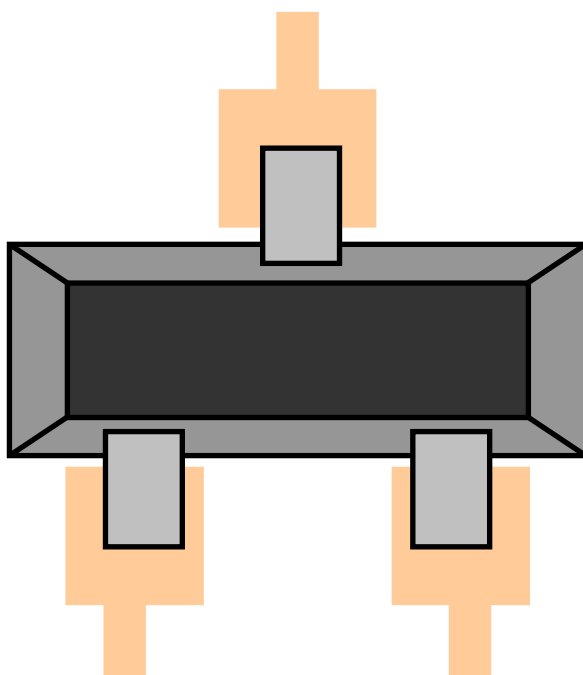


СУСКИН В.В.

**ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ
ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА**



Рязань 2001

СУСКИН В.В.

**ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ
ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА**

Рязань 2001

Сускин В.В.

Основы технологии поверхностного монтажа : - Рязань, Изд-во Узорочье, 2001. – 160 с., ил.

Излагаются основы современной технологии – технологии поверхностного монтажа компонентов на печатные платы при изготовлении электронных средств. Рассматриваются отечественная элементная база, выбор топологии знакоместа для обеспечения качественного паяного соединения компонентов на печатной плате, правила проектирования топологии печатного рисунка, материалы печатных плат, виды монтажа и пайки компонентов, проблемы качественного функционирования изделий, ремонт изделия, трафаретный способ нанесения пасты, оборудование для трафаретной печати, вопросы, связанные с технической подготовкой производства.

Работа предназначена для студентов вузов специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», а также для инженеров конструкторов-технологов предприятий, занимающихся развитием технологии поверхностного монтажа.

РЕЦЕНЗЕНТЫ: Д.т.н., профессор, Л.И. Захарьящев, зав. кафедрой конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры; к.т.н., член-корреспондент МАИ А.И. Худыш, генеральный директор ЗАО ФЛАНТ; к.ф.-м.н., С.П. Борисовский, директор НПЦ ОАО ПЛАЗМА; к.т.н., С.В. Румянцев, технический директор ОАО Завод «Красное знамя»; А.С. Ким, главный технолог ОАО Завод «Красное знамя»

ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ СУСКИН

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

ВВЕДЕНИЕ

Термин технология поверхностного монтажа (ТПМ) компонентов является обозначением нового направления в технологии производства электронных средств, которое обеспечивает микроминиатюризацию аппаратуры при одновременном росте ее функциональной сложности, что отвечает требованиям современного рынка. Основной предпосылкой появления ТПМ является новая элементная база - компоненты для поверхностного монтажа, которые намного меньше, чем их традиционные (DIP) эквиваленты, монтируемые в отверстия. Вместо длинных выводов они имеют очень короткие выводы или просто внешние контактные площадки. Такие компоненты непосредственно закрепляются на верхней или нижней (или обеих) сторонах печатной платы (ПП). Появление новой элементной базы обеспечивает:

- более высокую плотность монтажа на единицу площади ПП не только за счет уменьшения площади, занимаемой компонентами, но и благодаря устранению монтажных отверстий;
- снижение массогабаритных показателей при той же функциональной сложности;
- уменьшение величины паразитных индуктивностей и емкостей, что особенно важно в СВЧ-устройствах;
- отсутствие операций формовки и обрезки выводов компонентов повышает технологичность конструкций;
- унификацию и стандартизацию корпусов компонентов, что позволяет полностью автоматизировать технологический процесс с высокой надежностью;
- уменьшение расхода материала, улучшение электрических характеристик схем за счет сокращения длины проводников, исключение операций сверления и металлизации монтажных отверстий, что улучшает и механические характеристики плат;
- применение двухстороннего монтажа компонентов.

За указанными достоинствами ТПМ скрываются значительные недостатки приведенной технологии:

- устройства, изготовленные по ТПМ менее удобные, чем традиционные, для проверки, испытаний и ремонта из-за малого шага выводов компонентов, высокой плотности корпусов;
- остро стоит проблема теплоотвода, вследствие малого расстояния между корпусами компонентов, когда количество выделяемого тепла на единицу площади ПП резко увеличивается;
- при эксплуатации устройств повышается роль несогласованности температурных коэффициентов линейного расширения материалов ПП и компонентов.

Несмотря на указанные недостатки, ТПМ все больше и больше завоевывает свою популярность на рынке продукции, поскольку эти изделия качественнее своих аналогов, изготовленных по классической DIP-технологии. Данное положение заставляет предприятия пересмотреть свое производство и сориентировать его на прогрессивную технологию, однако при этом возникают ряд трудностей, основными из которых является отсутствие подготовленных кадров в области ТПМ и отсутствие в отечественной литературе учебного и справочного пособия по данной технологии.

Поэтому в настоящее время возникла необходимость в создании книги, которая могла бы служить пособием как для работников научно-исследовательских и опытно-конструкторских организаций, проектирующих изделия под технологию поверхностного монтажа, для работников технологических служб заводов, непосредственно внедряющих эту технологию в производство, так и для студентов вузов, изучающих современные технологии в производстве электронных средств.

Материалом для книги послужили научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, выполненные при участии автора, лекции по курсу «Прогрессивные технологии в производстве РЭС», читаемые в Рязанской государственной радиотехнической академии по специальности 2008 «Проектирование и технология производства РЭС», результаты исследований отечественных и зарубежных ученых.

Книга содержит 6 глав. Гл. 1 посвящена отечественной элементной базе, которая является основой ТПМ. Приводятся конструктивы компонентов, сравнительный анализ и рекомендации по геометрии посадочных мест, правила проектирования топологии печатных плат. В гл. 2 отражены особенности технологии изготовления печатных плат и большой спектр материалов основания печатных плат с целью решения проблемы теплоотвода и согласования коэффициентов линейного расширения платы и навесных компонентов. В гл. 3 анализируются различные варианты монтажа и виды пайки компонентов на печатной плате. Гл. 4 посвящена испытанию паяного соединения на механическую прочность, зависимости надежности, собранного по ТПМ, печатного узла от влияния внешних вибраций и температуры, оценке качества паяного соединения от количества наносимой пасты, проблеме контроля и ремонта. В гл. 5 рассматриваются трафаретный способ нанесения паяльной пасты на знакоместо печатной платы, требования к трафаретам, оборудование трафаретной печати. В гл. 6 раскрывается техническая подготовка производства, где предлагается формализованное описание конструкции с визуальным отображением создаваемого изделия на декомпозиционной основе с целью определения лучшего технологического процесса сборки по выбранному показателю качества. В приложении приводится список отечественных и зарубежных фирм по ТПМ.

Рассматриваемая проблема потребовала освещения широкого круга взаимосвязанных вопросов, что вызвало отдельные трудности в изложении. Учитывая также первый опыт написания такой книги, автор с благодарностью примет в свой адрес E-mail: // fkr@rgta. ryazan. ru все замечания и пожелания по дальнейшей её разработке.

Автор весьма признателен рецензентам, замечания которых способствовали улучшению содержания книги, ее методической, научной и практической направленности.

В процессе обсуждения рукописи ряд полезных замечаний был сделан зав. кафедрой технологии радиоэлектронной аппаратуры к. т. н., доцентом С.А. Лобановым, которые с благодарностью учтены автором.

Наконец, автор благодарен своим студентам, которые помогали в создании настоящей монографии.

1. КОМПОНЕНТЫ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

В настоящем разделе приведена отечественная элементная база, её особенности. Для технологии поверхностного монтажа, в принципе, пригодны любые миниатюрные компоненты, которые, кроме основных требований, удовлетворяют двум дополнительным:

- выдерживают жесткие технологические воздействия, обусловленные групповыми методами пайки (в парогазовой фазе, ИК - нагревом, погружением в расплавленный припой при пайке волной);
- пригодны для автоматизированного монтажа.

Если второе требование не является чем-то особенным для компонентов, монтируемых в отверстия (DIP-технология), то более жесткие технологические воздействия резко ограничили или сделали практически невозможным применение их для поверхностного монтажа.

Разработка компонентов для ТПМ ведется по двум направлениям:

- путем доработки существующей элементной базы до требований ТПМ;
- путем разработки новых компонентов, не имеющих аналогов в DIP-технологии.

Примером первого направления является доработка резисторов типа P1-12 и конденсаторов K10-17, второго - разработка оригинальных компонентов: переключателей, катушек индуктивности, реле и т.п.

Для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем переход к ТПМ осуществляется упаковкой кристаллов в корпуса, конструкция и материал которых удовлетворяет настоящей технологии (корпуса типа SOT, SOIC, PLCC, SO и др.).

Рассмотрим основные представители элементной базы для технологии поверхностного монтажа компонентов.

1.1. Пассивные компоненты

1.1.1. Постоянные резисторы

Для ТПМ применяют постоянные резисторы, выполненные как по толсто пленочной, так и по тонко пленочной технологии. Постоянные резисторы выпускаются в двух конструктивных исполнениях:

- цилиндрические с металлизированными выводами;
- прямоугольные чип - резисторы.

Отечественной промышленностью разработаны и серийно выпускаются постоянные непроволочные резисторы цилиндрической формы типа P1-11, аналогичные зарубежным MELF. Резисторы P1-11 изготавливаются в соответствии с ТУ ОЖ0.467.168 для работы на постоянном, переменном и импульсном токе, неизолированные, негерметичные, климатической категории и исполнения УХЛ5 по ГОСТ 15150-69. Внешний вид резистора приведен на рис.1, основные технические характеристики в табл.1 [12,24].

Таблица 1

Номинальная Мощность, Вт	Диапазон Сопротивлений, Ом	Предельные отклонения, %	Масса, Г
0,25	1...100* 100...10 ⁶ 10...10 ⁶	±5,±10 ±1,±2,±5,±10 ±5,±10	0,066
0,4	1...100 100...3*10 ³ 3*10 ³ ...10 ⁶ 10 ⁶ ...5,1*10 ⁶	±5,±10 ±2,±5,±10 ±1,±2,±5,±10 ±5,±10	

*Промежуточное значение по ряду E24

Таблица 2

Мощность, Вт	Габаритные размеры, мм				Международное Обозначение
	A	L	B	I	
0,062	0,4+0,2 -0,1	2,0±0,15	1,25±0,15	0,4±0,2	0805
0,125	0,6+0,2 -0,1	3,2+0,15 -0,2	1,6±0,15	0,4±0,2	1206
0,25	0,6+0,2 -0,1	3,2+0,15 -0,2	1,6±0,15	0,4±0,2	1206
1,0	0,6	6,0	3,0	-	2412
0,33	0,6	3,2	2,6	-	1210
0,5	0,6	5,0	2,5	-	2010
0,062 (P1-12*)	0,4	1,6	0,8	-	0603
0,032	0,35	1,0	0,5	-	0402

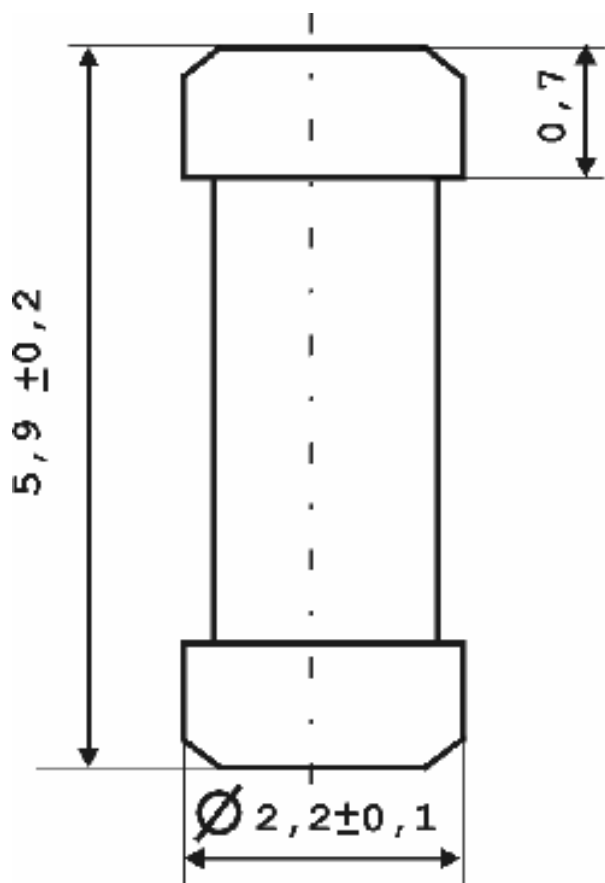


Рис. 1. Резистор типа
Р 1-11

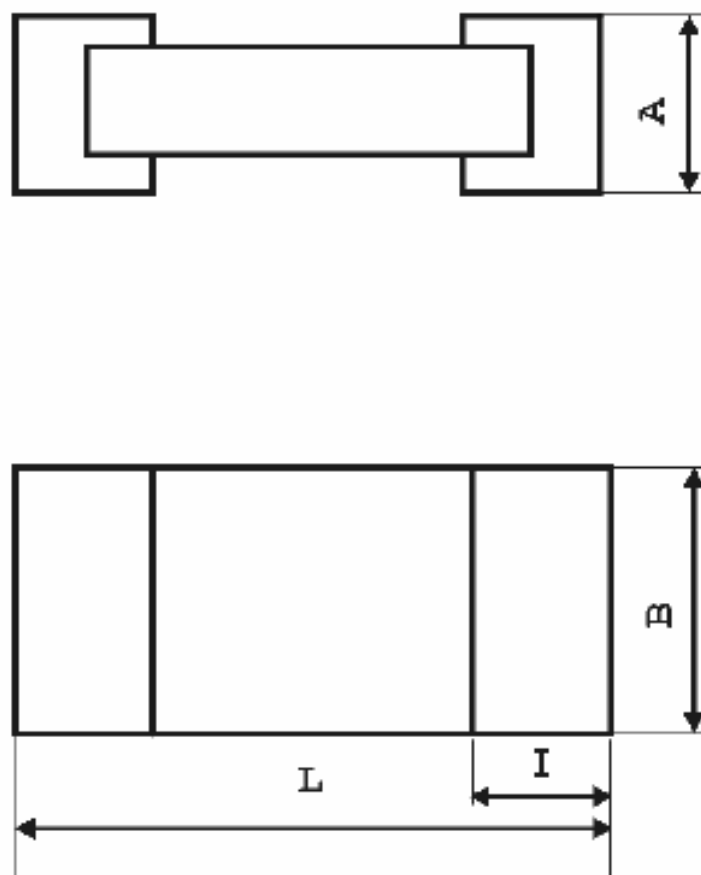


Рис. 2. Резистор типа
Р 1-12

Резисторы имеют $\text{TKC}(50...500) \cdot 10^{-6} \text{ 1 / } ^\circ\text{C}$, работоспособны в диапазоне температур от $-60...+70 \text{ } ^\circ\text{C}$ при относительной влажности до 98% при $25 \text{ } ^\circ\text{C}$. Предельное рабочее напряжение 250 В.

Монтаж резисторов производится пайкой колпачков непосредственно к площадкам печатной платы. При автоматическом монтаже допускается пайка волной припоя при непосредственном погружении резистора в припой при температуре $250 \text{ } ^\circ\text{C}$ на время не более 4 с. В случае крепления резистора клеем для его полимеризации, допускается воздействие ультрафиолетового облучения удельной мощностью до 100 Вт/см в течение одной минуты. Возможна трехкратная пайка с общим временем до 10 с, кроме того, допускается использование при монтаже припойной пасты. Резисторы поставляются россыпью, либо упакованными в пластмассовую формованную ленту, намотанную на бобину.

Резисторы второго типа получили более широкое распространение вследствие их лучшей приспособленности к автоматизированному монтажу. Прямоугольные чип резисторы являются перспективными для монтажа на поверхность. К достоинствам резисторов этого типа следует отнести: размеры стандартизованы на международном уровне; возможен автоматизированный монтаж; пайка методами ТПМ; наличие защиты внутреннего контактного слоя от растворения; упаковка в ленту.

Отечественной промышленностью разработаны и серийно выпускаются [12,24] чип - резисторы типа Р1-12. Они изготавливаются в соответствии с ТУ ОЖ0.467.169 и являются постоянными непроволочными резисторами общего применения, используются для работы на постоянном и переменном токах для монтажа на поверхность как для автоматизированной, так и для ручной сборки. Основные размеры приведены на рис.2 и в табл.2 [12].

Диапазон номинальных сопротивлений $1...22 \cdot 10^6$ Ом, промежуточные значения - ряд Е24, ряд Е48 для 0,125 Вт, 2 %, рабочий диапазон температур $-16...+125$ °С.

Резисторы Р1-12 допускают пайку волной припоя при температуре 265 °С в течение 4 с. Возможна повторная пайка с числом циклов не более двух и длительностью каждого до 3 с. При пайке волной припоя резисторы фиксируются на поверхности платы при помощи клея (ГИПК 231 ТУ 6-05-25-96-79). Допускается трехкратный нагрев до температуры $+150$ °С в течение 10 минут, до $+165$ °С - не более 15 с.

При автоматизированной сборке упаковка производится в перфорированную ленту, намотанную на катушку. Резисторы расположены резистивным слоем вверх, минимальное количество 4000 шт. Для ручной сборки - групповая потребительская тара (полиэтиленовый пакет). При монтаже не допускается ставить элементы резистивным слоем вниз.

В настоящее время разработаны и серийно освоены [24] в производстве прецизионные тонкопленочные чип - резисторы типов Р1-16, Р1-16М, выпускаемые по ТУ ОЖ0.467.179 и ТУ АБШК.434110.013 соответственно.

Резисторы Р1-16М являются постоянными непроволочными, прецизионными, незащищенными резисторами, пригодными для автоматизированной сборки; конструкторско – технологическая группа (КТГ) Х1, исполнения 2, 3. Резисторы выпускаются с габаритными размерами $3,2 \times 1,6 \times 0,7$ мм, трехсторонними выводами шириной 0,3 мм. Номинальная мощность 0,125 Вт, диапазон номинальных сопротивлений 10 Ом...1 МОм, предельное отклонение $\pm 0,1... \pm 0,5$ %, $TKC(5...800) \cdot 10^{-6}$ 1/°С. Пайку допускают волной припоя, погружением в расплавленный припой при температуре $+265$ °С в течение 4 с. Фиксацию проводят на плате клеем ТК 200 по ТУ 6-10-863-76, ВК9 по ОСТ 4ГО.029.004, БФ2 по ГОСТ 12172-74.

1.1.2. Переменные резисторы

К их особенностям относятся миниатюрная конструкция, совместимость с поверхностными методами пайки, возможность автоматизированной сборки, упаковка в стандартную ленту, либо в групповые кассеты.

Отечественная промышленность выпускает [24] переменные резисторы для ТПМ следующих типов: РП1-75, РП1-82, РП1-83, РП1-98. Миниатюрные подстроечные керметные резисторы типа РП1-83 (АПШК.343160.018 ТУ) представляют собой квадратный пластмассовый корпус, в котором отпрессовано керамическое основание с нанесенными на него резистивным элементом и выводами. Общий вид, габариты

ритные и установочные размеры резистора РП1-83А приведены на рис.3. Резисторы допускают пайку в паяльной ванне при температуре 265 °С в течение 4 с.

Типичными представителями резисторов зарубежного производства [12] являются миниатюрные переменные резисторы серий ST-4А и ST-4В. Компоненты обеих серий имеют идентичные электрические характеристики, которые приведены в табл.3 и различаются лишь конструкцией выводов корпусов: первые имеют I-образные выводы (рис.4), вторые - L-образные (рис.5); первые занимают меньшую площадь на плате - 20,1 мм² в сравнении с 30,1 мм².

Характеристики резисторов:

Номинальная мощность рассеяния (при 70 °С), Вт.....	0,25
Предельное рабочее напряжение, В.....	200
Интервал рабочих температур, К.....	218 - 393
ТКС, 10 ⁻⁶ град ⁻¹	±100 (для 100 Ом...2 МОм)
	±250 (100 Ом...50 кОм)
Допустимое отклонение сопротивления, %.....	±20
Угол поворота	
механический.....	240
электрический.....	210
Вращательный момент, Н*м.....	0,15 (макс.)
Масса (100 шт.), г.....	140

Резисторы надежно герметизируются с помощью уплотнительных колец. Корпуса компонентов рассчитаны на пайку при температуре 260 °С в течение 10 с (макс.) или 215 °С в течение 35 с. Они выдерживают климатические испытания по MIL-STD 202.

Особым видом переменного резистора можно считать сдвоенный (center taped resistor), состоящий из двух резисторов, заключенных в общий корпус, которые регулируются отдельно до суммарной величины, лежащей в пределах от 100 Ом до 1,5 МОм. Допустимое отклонение составляет ±0,02 %, ТКС равен ±25*10⁻⁶ 1/ °С.

1.1.3. Конденсаторы постоянной емкости

В ТПМ используются в основном три вида конденсаторов постоянной емкости: многослойные керамические монокристаллические чип конденсаторы, танталовые оксидно-полупроводниковые и алюминиевые оксидно-электролитические конденсаторы.

Многослойные керамические монокристаллические чип – конденсаторы представляют собой несколько обкладок, соединенных параллельно, что обеспечивает высокую удельную емкость, обладают высокой температурной стабильностью, влагостойкостью, высокой надежностью. Диапазон емкостей от 1пФ до 1мкФ. Геометрия чип - конденсатора аналогична конструкции чип – резистора (рис.2).

Отечественная промышленность выпускает монокристаллические чип конденсаторы, данные которых приведены в табл.4. Конденсаторы удовлетворяют всем требованиям ТПМ, предназначены для автоматизированной сборки, упаковываются в блистер - ленту, которая наматывается на катушку. Количество конденсаторов на ленте - 3000 шт.

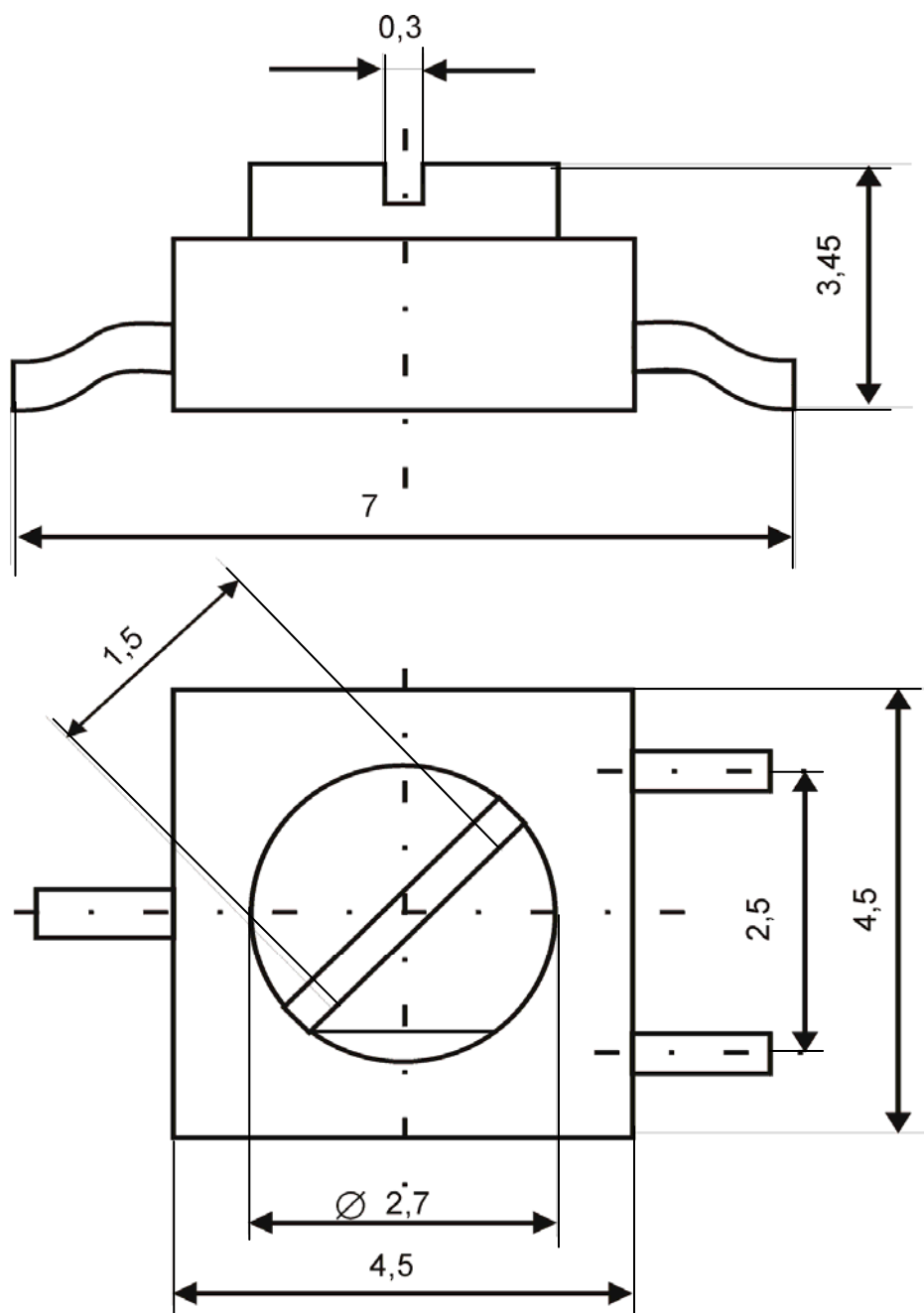


Рис.3. Резистор типа РП1-83А

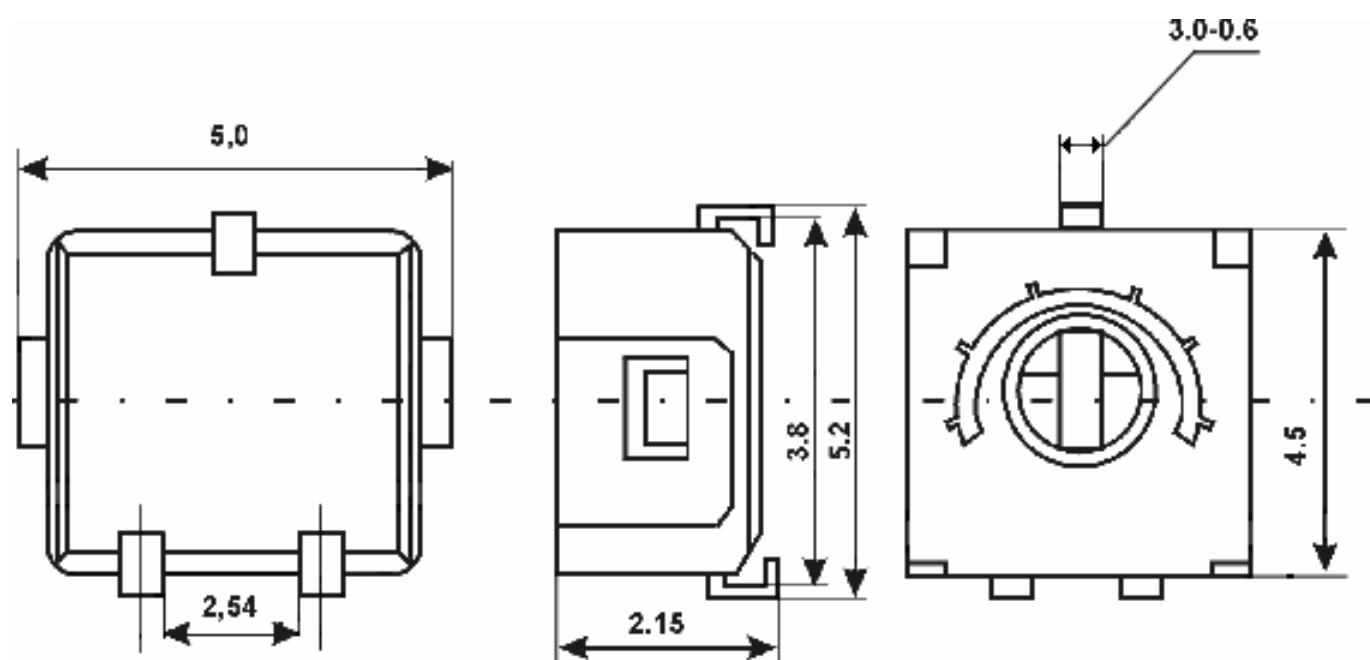


Рис. 4. Конструкция, габаритные и присоединительные размеры корпусов ST-4A. Размер шлица - 3,2 (длина); 0,6 (ширина); 0,5 - глубина

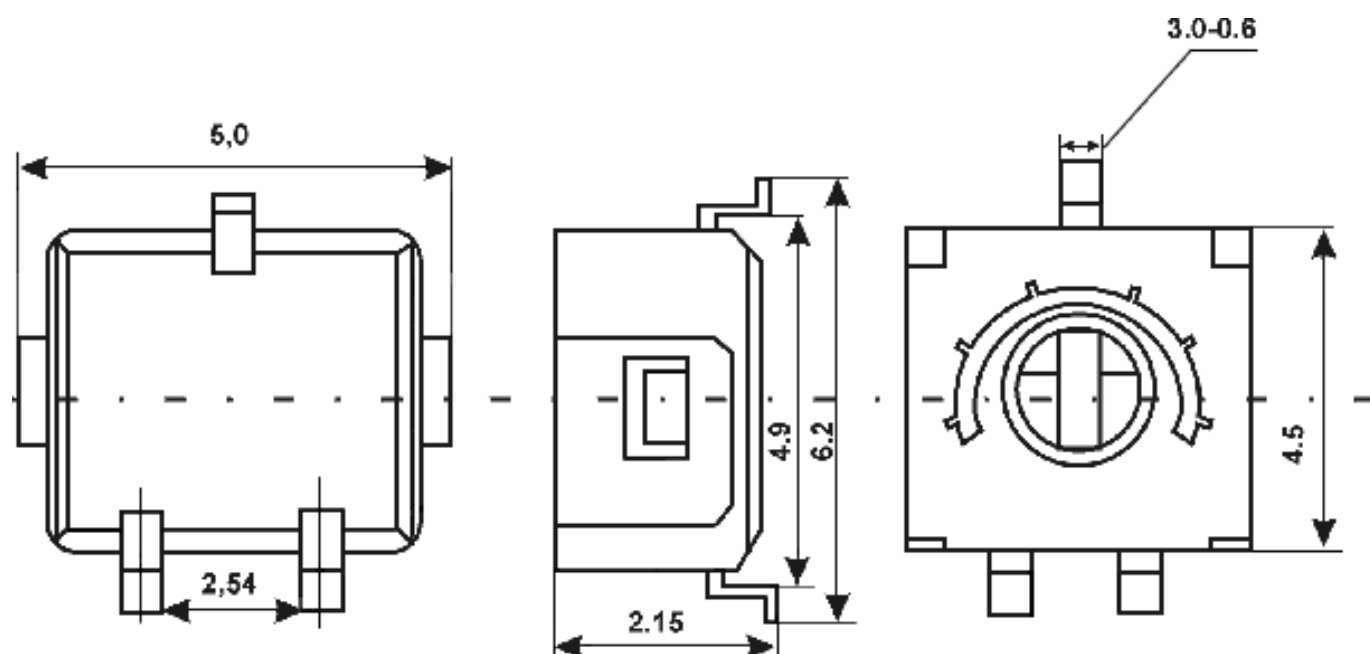


Рис. 5. Конструкция, габаритные и присоединительные размеры корпусов ST-4B. Размер шлица - 3,2 (длина); 0,6 (ширина); 0,5 - глубина

Таблица 3

Номинальное сопротивление, Ом	Рабочее напряжение, В	Ток, мА
10	1,58	100
20	2,23	100
50	3,53	70,7
100	5,00	50,0
200	7,07	35,4
500	11,20	22,4
1К	15,80	15,8
2К	22,40	11,2
5К	35,4	7,07
10К	50,5	5,00
20К	70,7	3,54
50К	112	2,24
100К	158	1,58
200К	200	1,00
500К	200	0,40
1М	200	0,20
2М	200	0,10

Таблица 4

Тип	ТУ	Габариты, мм	Ёмкость
K10-17	ОЖ0.460.172	3,2x1,6x1,2	22пФ...0,15мкФ
K10-42	ОЖ0.460.167	1,5x1,4x1,2	1;1,2;1,5;1,8;2,2...22пФ
K10-43	ОЖ0.460.165	(4..12)x(3,2..11)x2,7	21,5пФ...0,044мкФ
K10-47	ОЖ0.460.174	(4..12)x(3,2..11)x(1,8..4,5)	10пФ...15мкФ
K10-50	ОЖ0.460.192	(1,5...5,5)x(1,3...4,6)x(1,4...2)	0,47мкФ...6800пФ
K10-56	ОЖ0.460.198	3,2x1,6x1,2	0,47мкФ...6800пФ
K10-57	ОЖ0.460.194	(2...3,2)x(1,9...3)	680пФ...4,7мкФ
K10-60	ОЖ0.460.209	(1,5...5,5)x(1...4)x(1,4...1,6)	680пФ...4,7мкФ
K10-73	ЯАВС.673511.004	3,2x1,6x1,0	22пФ...0,15мкФ

Танталовые оксидно-полупроводниковые конденсаторы. Отечественная промышленность выпускает конденсаторы для ТПМ следующих типов: К53-36, К53-37, К53-40, основные данные, которых приведены в табл.5.

Таблица 5

Тип	ТУ	Габариты, мм	Ёмкость, мкФ
К53-36	ОЖ0.464.294	(4,2...4,5)х(2...2,5)х(2,5...5)	0,1...68
К53-37	НДПК.673546.0007	(1,6...4)х(1,6...3)х(4...7,1)	0,1...100
К53-40*	ОЖ0.464.264	8х5,6х(3,2...5,1)	0,1...100

*Алюминиевые оксидно-полупроводниковые конденсаторы

1.1.4. Подстроечные конденсаторы

В настоящее время в отечественной промышленности освоен выпуск подстроечных конденсаторов [24] для монтажа на поверхность с габаритными размерами $4,5 \times 4,5 \times 3$ мм, емкостью 0,8/2,4 и 3,5/10 пФ, с рабочим напряжением 50 В.

1.2. Активные компоненты

Для поверхностного монтажа дискретные полупроводниковые компоненты выпускаются в малогабаритных пластмассовых корпусах типа SOT [12,26] . Транзисторный миникорпус SOT - Small Outline Transistor применяется для корпусирования дискретных полупроводниковых приборов. Имеются стандартные корпуса, которые можно использовать для герметизации простых полупроводниковых приборов (т.е. одиночных биполярных и полевых транзисторов, диодов, стабилитронов и др.). Это корпуса SOT-23 и SOT-89. Выбор типа корпуса зависит от мощности рассеиваемой прибором и реального размера полупроводникового кристалла. SOT-23 применяется для корпусирования кристаллов, имеющих площадь до $19,35 \text{ мм}^2$, с рассеиваемой мощностью 200 мВт при температуре 25°C (в некоторых паспортах изделий указывается до 350 мВт). Второй корпус, SOT-89, рассчитан на кристаллы площадью $38,70 \text{ мм}^2$, рассеивающие мощность до 500 мВт при 25°C (в некоторых паспортах указывается до 1 Вт).

Оба корпуса имеют очень простую конструкцию с тремя выводами: у SOT-23 выводы поочередно отходят от каждой из сторон корпуса, в то время как у SOT-89 они расположены по одну и ту же сторону корпуса, а центральный вывод имеет увеличенный размер для лучшего отвода тепла.

Важно отметить, что в разработке подобных корпусов для одиночных приборов прослеживается тенденция к повышению уровня рассеиваемой мощности, с тем,

чтобы, в конечном счете, можно было непосредственно помещать в такие корпуса для поверхностного монтажа мощные приборы, как, например, переключающие транзисторы и выпрямители, без каких-либо особых изменений конструкции платы с целью улучшения ее производительности.

Отечественной электронной промышленностью разработаны и стандартизованы аналогичные корпуса (ГОСТ 18472-88):

- КТ-46 (SOT-23), представленный на рис.6 и в табл. 6;
- КТ-47 (SOT-89), представленный на рис.7 и в табл. 7;
- КТ-48 (SOT-143), представленный на рис.8 и в табл. 8.

Электронная промышленность [12,24] выпускает довольно много различных диодов и транзисторов в указанных корпусах.

Для поверхностного монтажа интегральные микросхемы выпускаются в сложных многвыводных корпусах типа: SO, SOL, VSO, QFP, PLSS, SOIC, SOLIC [26,31].

Отечественная промышленность [24] выпускает корпуса для ТПМ с выводами в виде "крыла чайки", которые стандартизованы в ГОСТ 17467-88 как подтип 43. Габаритные чертежи и размеры этих корпусов приведены на рис.9, 10 и в табл.9.

Более подробное описание активных компонентов и компонентов неправильной формы (переключатели, реле и др.) представлено в [12,24,26].

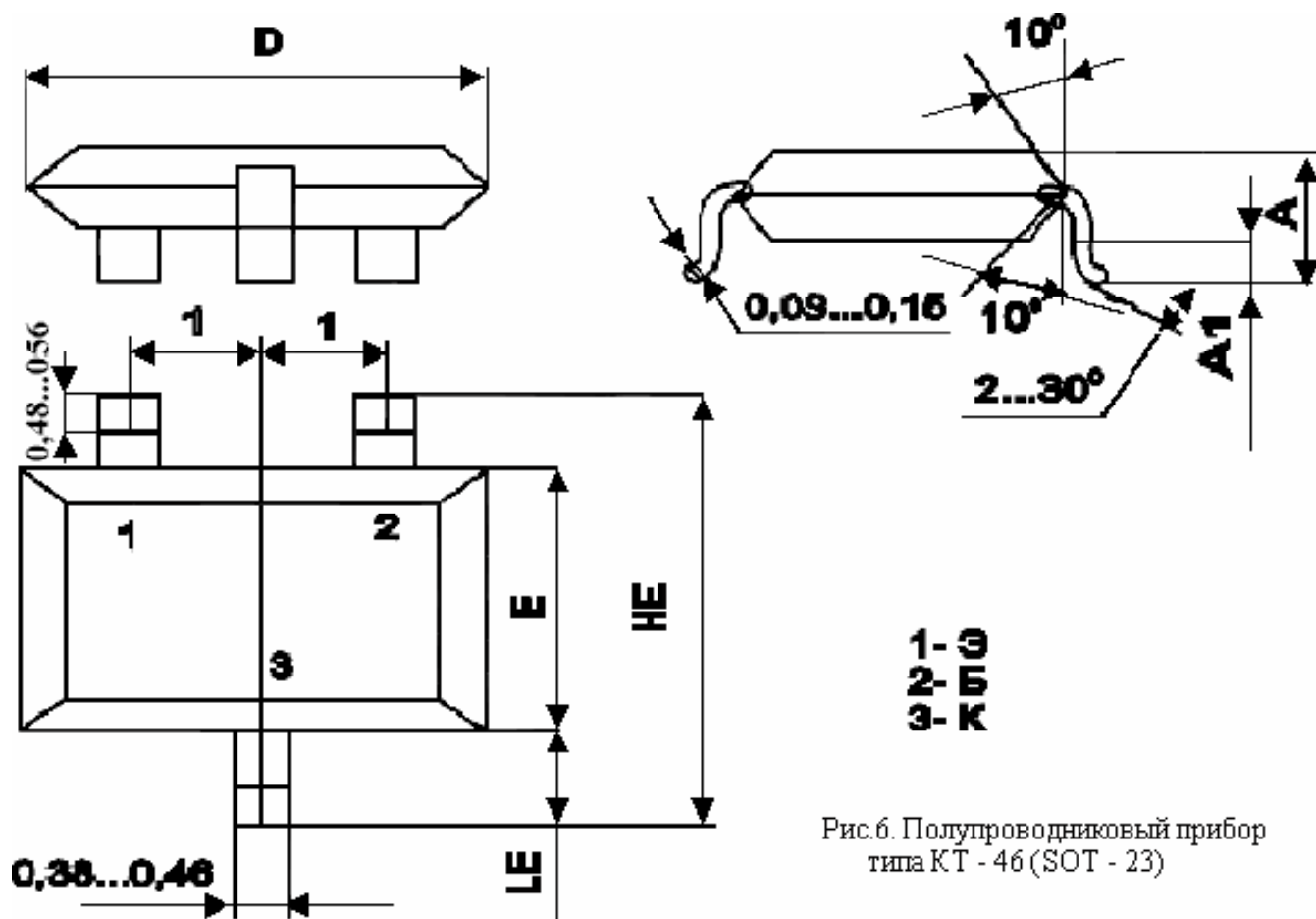


Рис.6. Полупроводниковый прибор типа КТ - 46 (SOT - 23)

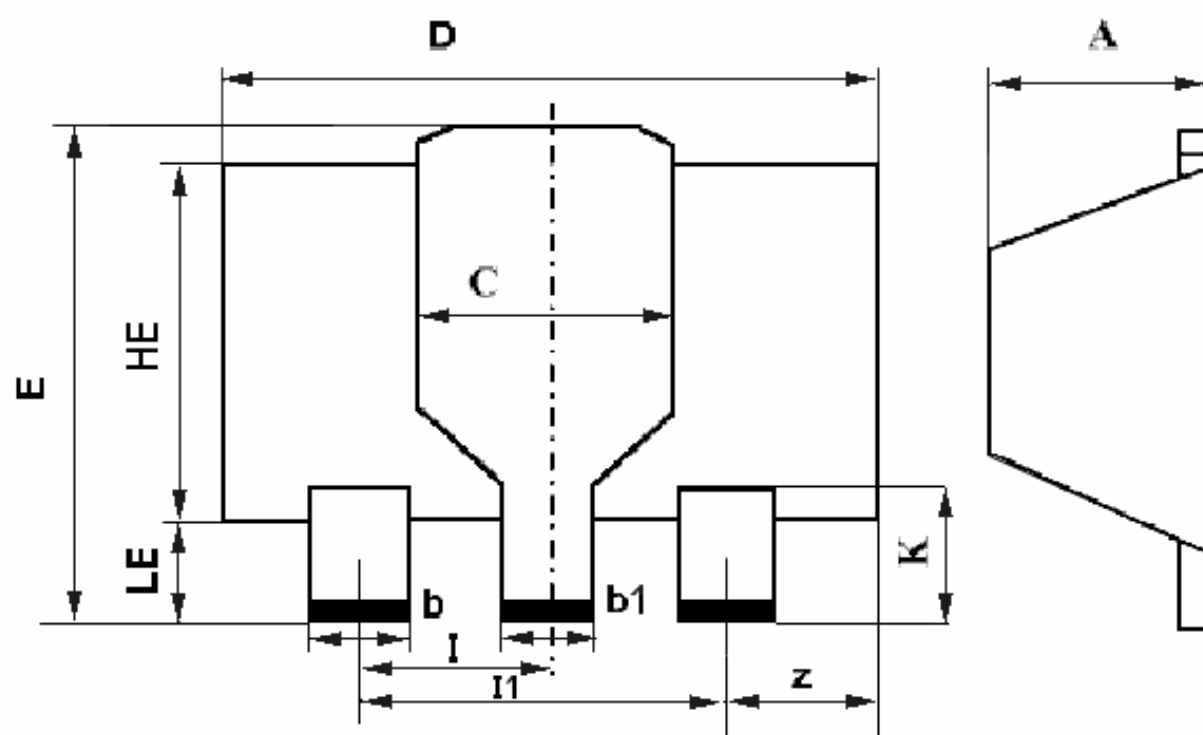


Рис. 7. Корпус типа КТ - 47 (SOT - 89)

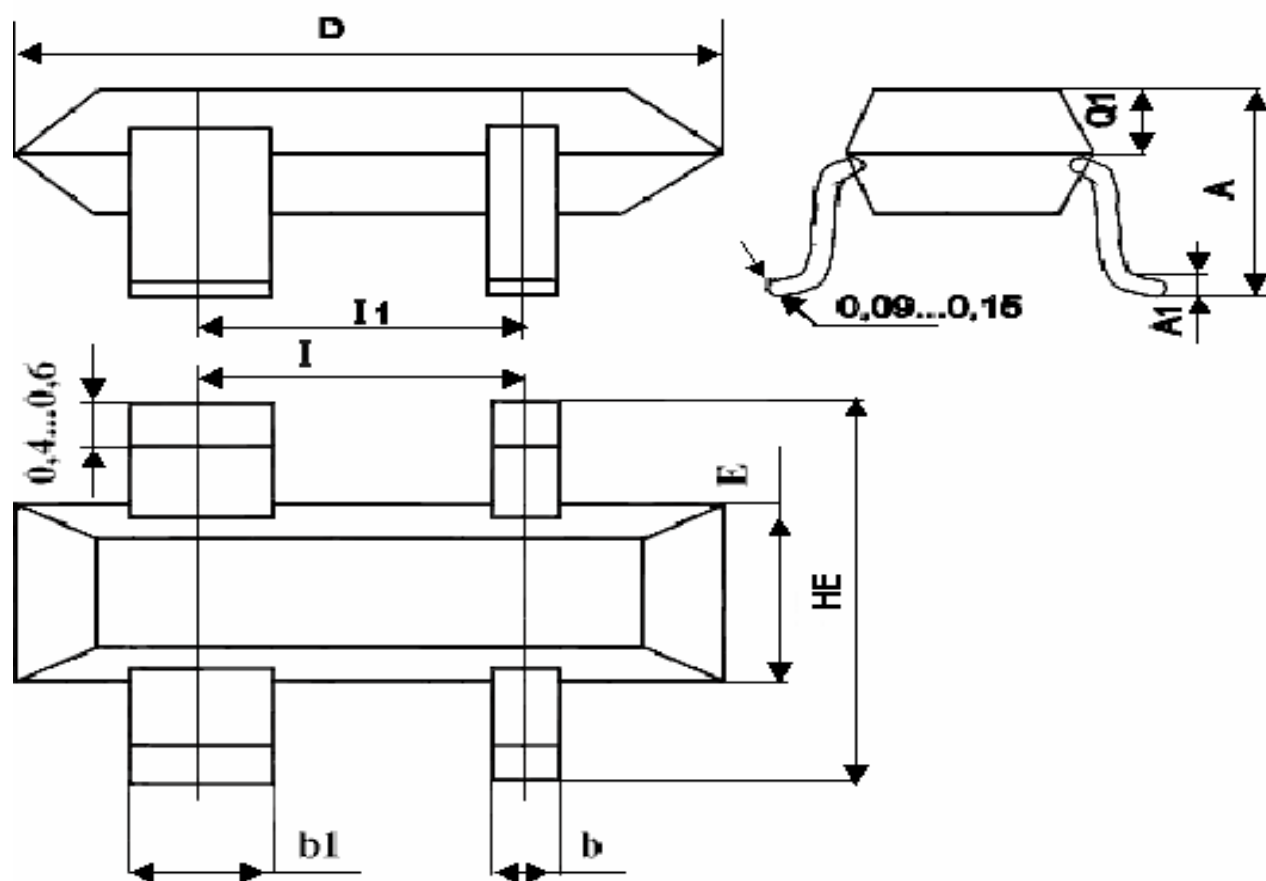


Рис. 8. Корпус типа КТ - 48 (SOT - 143)

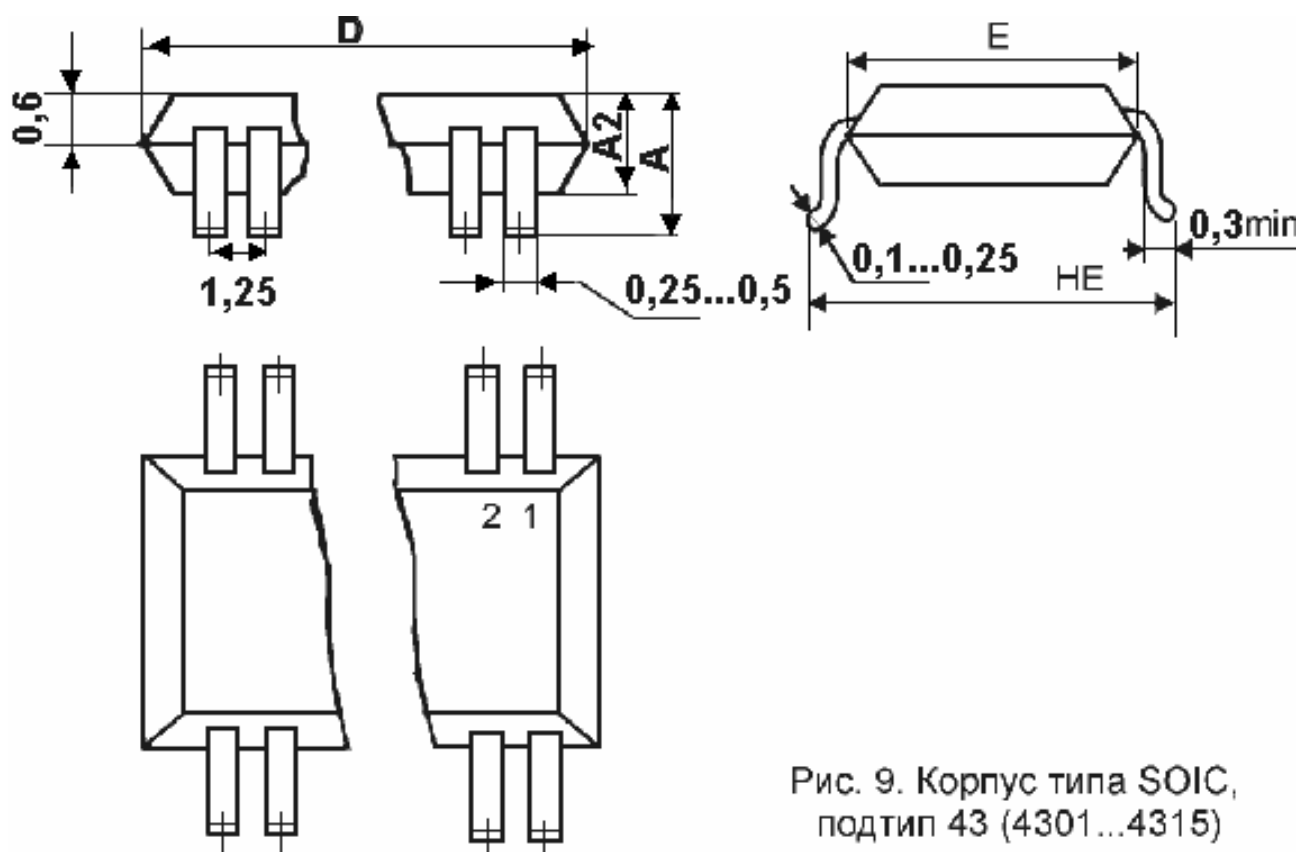


Рис. 9. Корпус типа SOIC,
подтип 43 (4301...4315)

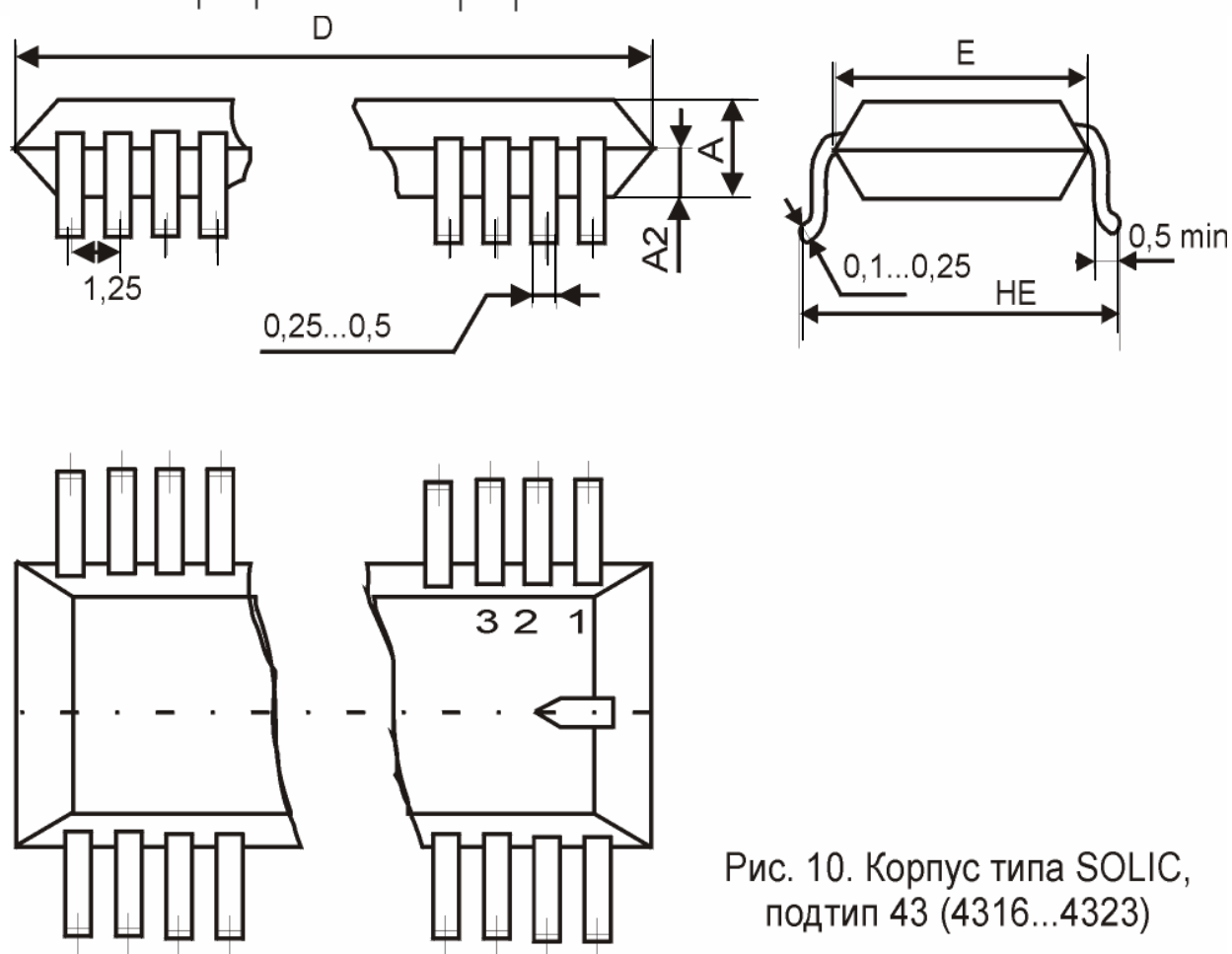


Рис. 10. Корпус типа SOLIC,
подтип 43 (4316...4323)

Таблица 6

Обозначение Размера	Размеры, мм		
	Не менее	Номинал	Не более
A	0,85	-	1,1
A1	0,1	-	0,2
D	2,8	-	3,0
E	1,2	-	1,4
HE	2,2	-	-
LE	0,5	-	0,65

Таблица 7

Обозначение Размера	Размеры, мм		
	Не менее	Номинал	Не более
A	1,4	-	1,6
B	0,37	-	0,46
b1	0,4	-	0,55
C	1,77	-	1,80
D	4,4	-	4,6
E	4,4	-	4,6
I	-	1,5	-
II	-	3,0	-
HE	3,75	-	4,25
LE	0,7	-	1,2
Z	0,7	-	0,9
K	0,76	-	0,88

Таблица 8

Обозначение Размера	Размеры, мм		
	Не менее	Номинал	Не более
A	0,85	-	1,1
A1	0,1	-	0,2
B	0,33	-	0,46
b1	0,77	-	0,83
D	2,8	-	3,0
E	1,2	-	1,4
I	-	1,9	-
II	-	1,7	-
HE	2,1	-	2,5

Таблица 9

Тип	Число выводов	Размеры, мм				
		A	A2	D	E	HE
4301	4			2,5		
4302	6			3,75		
4303	8			5,0		
4304	10	2	1,65	6,25	4	6,3
4305	12			7,5		
4306	14			8,75		
4307	16			10,0		
4308	16	2	1,65	10,0	5	7,3
4309	8			5,4		
4310	10			6,64		
4311	14	2,5	2	9,14	4,65	6,7
4312	16			10,4		
4313	14			9,14		
4314	16	3	2,65	10,4	5,7	8,2
4315	20			12,9		
4316	16			10,4		
4317	18			11,64		
4318	20	3	2,65	12,9	7,5	10,5
4319	24			15,4		
4320	28			17,9		
4321	24	3,05	2,65	15,4	8,5	12,5
4322	28			17,9		
4323	32	3,05	2,8	20,4	11,3	14,4

1.3. Технологические особенности монтажа компонентов

Основными особенностями компонентов для ТПМ являются:

1. Малые габаритные размеры.

2. Симметричность и точное расположение выводов или контактных площадок (поверхностей) относительно геометрического центра корпуса, что позволяет производить захват компонента вакуумной присоской (пинцетом), ориентировать его симметрично по осям X и Y в сборочных головках и устанавливать на печатную плату (ПП) с совмещением выводов с припойными площадками знакоместа.

3. Возможность применения групповой пайки общим нагревом.

4. Отсутствие предварительной подготовки выводов (контактных площадок).

Первая и вторая особенности позволяют осуществить монтаж компонентов очень широкой гаммы с использованием одного оборудования при обеспечении ручной или автоматической смены захватных устройств (сборочных головок) и при наличии необходимого количества различных питателей под соответствующую номенклатуру и упаковку компонентов. В этом случае капитальные затраты значительно сокращаются, как и потребность в производственных площадях, а автоматизация производства будет эффективной даже при небольших размерах партии изделий мелкосерийного производства.

Третья и четвертая особенности обуславливают высокую производительность процесса сборки и снижение трудоемкости, однако, следует сделать следующие замечания по отечественным компонентам, не позволяющие реализовать в полном объеме отмеченные преимущества:

- точность изготовления многих типов корпусов микросхем не удовлетворяет требованиям автоматизации;

- форма корпуса у некоторых видов компонентов не оптимальна, т.е. высота сравнима (или почти равна) с длиной, что вызывает теневой эффект при пайке волной припоя или возможное вздыбливание (эффект "надгробного камня") при пайке оплавлением, усугубляемое неравномерным лужением. Желательное соотношение длины корпуса к высоте 2 : 1 (не менее 1,5 : 1);

- чип - конденсаторы почти всех марок имеют большие допуски на размеры корпуса (до 33 % от длины);

- луженое покрытие контактных площадок при пайке волной припоя смывается;

- практически не реализуется требование унификации корпусов конденсаторов. Так, одна марка конденсатора может иметь до 11 типоразмеров, а в одном габаритном размере - различные допуски;

- планарные микросхемы могут быть только условно отнесены к поверхностно - монтируемым, т.к. они не выдерживают общий нагрев, а их выводы нуждаются в подготовке к монтажу.

Как показывает анализ отечественной базы компонентов из 326 типов микросхем, разработанных в корпусе "Н", серийно выпускаются только 17 видов.

Полупроводниковые приборы в корпусе SOT выпускаются 25 типов. Безвыводные резисторы выпускаются одного типа Р1-12, при этом резисторы мощностью 0,062 Вт не до конца освоены. Выпускаются безвыводные резисторы других типов, но они применимы только в гибридных интегральных схемах, герметизируемых в корпусе. Выпускается четыре типа безвыводных неполярных конденсаторов. Следует отметить, что все перечисленные компоненты выпускаются в ограниченном объеме, что сдерживает развитие отечественной аппаратуры в поверхностном исполнении.

Рассмотрим возможности отечественной элементной базы, предназначенной для ТПМ [4-6,31]. Керамические конденсаторы К10-17В и К10-42В при монтаже на поверхность ПП должны, согласно ТУ, предварительно нагреваться для предотвращения термоудара при пайке, который может привести к появлению микротрещин по всему объему конденсаторов (ОСТ 11.074.011-79, ОСТ В11.0030-84). Конечная температура подогрева конденсаторов зависит от марки применяемого припоя, что, в свою очередь, допускается условиями эксплуатации аппаратуры. При температуре эксплуатации конденсаторов 85 °С пайку необходимо производить припоем ПСрОС 3-58 (ГОСТ 19738-74) или другим припоем с содержанием серебра не менее 2 %. При эксплуатации конденсаторов при температуре ниже 85 °С для пайки применяется припой ПОСК 50-18 (ГОСТ 21930-76). Применение данных припоев связано с наличием подслоя серебра на контактных площадках, которое в случае применения припоев, не содержащих серебра или имеющих более высокую температуру плавления, чем ПОСК 50-18, растворяются в припоях, что приводит к разрушению контактного перехода на торцах конденсатора. Согласно требованиям ОСТ В11.0030-84 и ОСТ 11.074.011-79, допускается только одноразовая пайка конденсаторов при этом время пайки не должно превышать 3-х секунд.

Оптимальный вариант пайки безвыводных конденсаторов К10-17В и К10-42В на поверхности ПП - групповая пайка с предварительным нанесением на припойные площадки лудящей пасты ПЛ-423 (АУК 0.029.015 ТУ) на основе ПОСК 50-18 или ПЛ-312 (АУК 0.029.009 ТУ) на основе припоя ПСрОС 3-58. Оборудование для групповой пайки должно иметь зону предварительного нагрева с плавной регулировкой температуры. Перед групповой пайкой допускается приклеивание компонентов к основанию ПП.

Резисторы Р1-12, применяемые в ТПМ, подразделяются на две группы по мощности рассеяния и методу монтажа. Резисторы с мощностью рассеяния 0,062 Вт предназначены только для ручной сборки печатных узлов, а с мощностью рассеяния 0,125 Вт - для ручной и автоматизированной сборки, а также для групповой пайки или пайки с помощью паяльника. Согласно требованиям ТУ на резисторы и ОСТ 11.070.069-81, пайку резисторов с мощностью рассеяния 0,062 Вт необходимо производить с помощью паяльника мощностью не более 25 Вт припоями ПСрОС 3-58 или ПОС 50-18 при температуре пайки не выше 235 °С и длительности не более 3-х секунд.

Предпочтительными для ТПМ являются резисторы Р1-12 с мощностью рассеяния 0,125 Вт. Эти резисторы можно паять припоем ПОС-61, ПОСК 50-18, время

пайки не более 4 с, допускается трехкратное воздействие расплавленного припоя на резистор, специальная подготовка перед монтажом не требуется.

В качестве подстроечного элемента можно применять резистор СПЗ-28, имеющий облуженные металлизированные контактные площадки для пайки на поверхность ПП. Пайку можно производить паяльником мощностью 40 Вт, припоем ПОС-61 или оплавлением лудящей пасты ПЛ-112 (АУК 0.029.009 ТУ), предварительно нанесенной на припойную площадку ПП.

Транзисторы и диоды, согласно требованиям ТУ на полупроводниковые приборы ОСТ 11.336.907-79, монтируются на поверхность ПП методом групповой пайки или с помощью паяльника. При групповой пайке на припойные площадки ПП наносится лудящая паста ПЛ-112, устанавливаются компоненты, а затем производится оплавление лудящей пасты под воздействием тепла в установках групповой пайки. При ручной пайке паяльником применяется припой ПОС-61, время пайки не более 4 с. Допускается производить пайку транзисторов и диодов волной припоя, но при этом их предварительно приклеивают к поверхности ПП. Вместе с тем, при пайке волной припоя нельзя достигнуть высокой плотности монтажа из-за возникновения теневых зон за счет перекрытия зон пайки корпусами компонентов.

При температуре эксплуатации безвыводных компонентов не выше 85 °С можно применять лудящую пасту ПЛ-423. При температуре эксплуатации выше 85 °С следует применять припои или лудящие пасты на основе этих припоев согласно требованиям ТУ на компоненты, а именно ПОС-61 или ПСрОС 3-58.

В связи с тем, что в настоящее время не производятся электролитические конденсаторы для ТПМ, в ряде разработок применяют электролитические конденсаторы типа К53-22. Они применяются в гибридных схемах в составе герметизированных блоков и поэтому в ТПМ требуются дополнительные меры защиты таких компонентов от воздействия окружающей среды. Согласно требованиям ТУ на эти компоненты (ОСТ В 11.0025-84 и ОСТ11.074.011-79), монтаж конденсаторов производится ручным способом, пайкой припоем ПОС-61 с помощью паяльника. Допускается одноразовая пайка. Защиту конденсаторов К53-22 осуществляют клеем ВК-9 с подслоем эластичного компаунда типа ВГО-1 для снятия механических напряжений, возникающих при отверждении клея.

В табл. 11 приведены технологические особенности монтажа применяемых компонентов, паяемость которых сохраняется в течение 12-и месяцев.

В приложении приведены отечественные и зарубежные фирмы – изготовители компонентов для ТПМ.

1.4. Знакоместо для компонентов

Определение. Под знакоместом понимается конструкция припойных площадок печатного рисунка печатной платы, на которые своими контактными площадками устанавливается компонент. Проблема проектирования топологии посадочного места компонента (знакоместа) в технологии поверхностного монтажа связана с необходимостью обеспечения максимальной плотности упаковки компонентов на печатной плате и высокого качества паяного соединения.

Таблица 11

Наименование компонента (ГОСТ, ТУ)	Материал герметизирующего покрытия (ГОСТ, ТУ)	Марка Припоя (ГОСТ, ТУ)	Метод Пайки	Температура и время пайки	Растворитель для отмычки от остатков флюса (ГОСТ, ТУ)
1	2	3	4	5	6
Конденсатор К10-17в (ОЖ0.460.107 ТУ)	Лак УР-231 (ТУ 6-10-063-84)	ПОСК 50-18 (ГОСТ 21930-76)	Групповая, паяльник	200 +10 °С	П.6.2.5 (ОТУ; ОСТ В110030-84)
Конденсатор К10-42в (ОЖ0.460.167 ТУ)	ЭП-730 (ГОСТ 2082-81)	ПСрОС 3-58 (ГОСТ 19738-74) ПЛ-423 (АУК 0.029.009.ТУ)	----- Групповая	190 +10 °С 245 +5 °С	Ацетон, бензин -----
Конденсатор К53-22 (ОЖ0.464.158 ТУ)	ВК-9, подслои эластил	ПОС-61 (ГОСТ 21930-76) ПОСК 50-18 ПЛ-112 (АУК 0.029.0009 ТУ)	Паяльник ----- Групповая	260 +5 °С 200+10 °С, 4с 270 +5 °С	Спирт этиловый (ГОСТ 18300-72) ----- -----
Подстроечный резистор СП-28 (ОЖ0.468.166 ТУ)	Не требуется	ПОС-61 ПЛ-423 ПЛ-112	Паяльник Групповая -----	160 +5 °С, 4с 190 +10 °С 260 +5 °С	Спирто-бензиновая смесь (1:1)
Резистор Р1-12-0,125 (ОЖ0.467.169 ТУ)	Не требуется	ПОС-61 ПОСК50-18 ПЛ-423 ПЛ-112	Паяльник Паяльник Групповая Групповая	260 +10 °С 200 +10 °С 190+10 °С, 4с 260 +10 °С	-----
Транзисторы, диоды в корпусах SOT-23, SOT-89	Лак УР-231 ЭП-730	ПОС-61 ПОСК 50-18 ПЛ-423 ПЛ-112	Паяльник ----- Групповая -----	260 +5 °С 200 +10 °С 190 +10 °С 260+5 °С, 3с	-----

В отечественной и зарубежной литературе приводятся примеры топологии знакомест компонентов под технологию поверхностного монтажа. Эти примеры не являются единственными возможными вариантами топологии, и в настоящее время несколько компаний продолжают экспериментальные работы с целью оптимизации выбора топологических знакомест в зависимости от конкретных условий применения изделий.

Как правило, выбираемая топология припойной площадки знакоместа должна быть идентична топологии контактной площадки компонента, однако надо учитывать следующие особенности:

- эффект скольжения компонента по расплавленному припою;
- эффект "надгробного камня";
- термоциклирование, когда слишком большое количество припоя приводит к увеличению жесткости места соединения "вывод компонента - припойная площадка", которое становится хрупким при тепловой нагрузке;
- поведение паяного соединения во время термоциклирования;
- снижение перегрева чип - компонента. Здесь тепловой режим оказывает значительное влияние на надёжность, например чип - резистора, поскольку тепло отводится через выводы на припойную площадку и через печатные проводники в окружающую среду.

В попытке повысить технологичность изделий некоторые фирмы, в настоящее время, экспериментируют при проектировании топологии с закругленными припойными площадками знакоместа, другие предлагают следующие варианты расчета топологии знакоместа, исходя из размеров конструктива пассивного чип - компонента. Например, фирма "*RCD Components Corp.*" [7] рекомендует размеры припойной площадки знакоместа для обеспечения теплового режима чип - компонента (рис.11,б). Фирма "*NU-Grafix Corp.*" предлагает свой вариант топологии знакоместа для пассивных компонентов (рис.11,в). На рис. 11,а приведены размеры чип – компонента.

В настоящей работе на основе экспериментальных данных и теоретических разработок автором предлагаются следующие размеры знакоместа под отечественный компонент с учетом применения технологии пайки путем оплавления припойной пасты в проходной ИК-печи (рис. 12) [35].

$$A = K * T + dL / 2 + M;$$

$$B = W + 0,2 * T;$$

$$C = L - 2 * M - dL ,$$

$$\text{для } L < 6 \text{ мм, } K = 0,35;$$

$$L > 6 \text{ мм, } K = 0,45,$$

где L - длина компонента; W - ширина компонента; T – высота компонента; M - ширина металлизации вывода; dL - допуск отклонения размера компонента по длине. Эти размеры обеспечивают лучшие характеристики паяного соединения, которые подробно рассмотрены в главе 4.

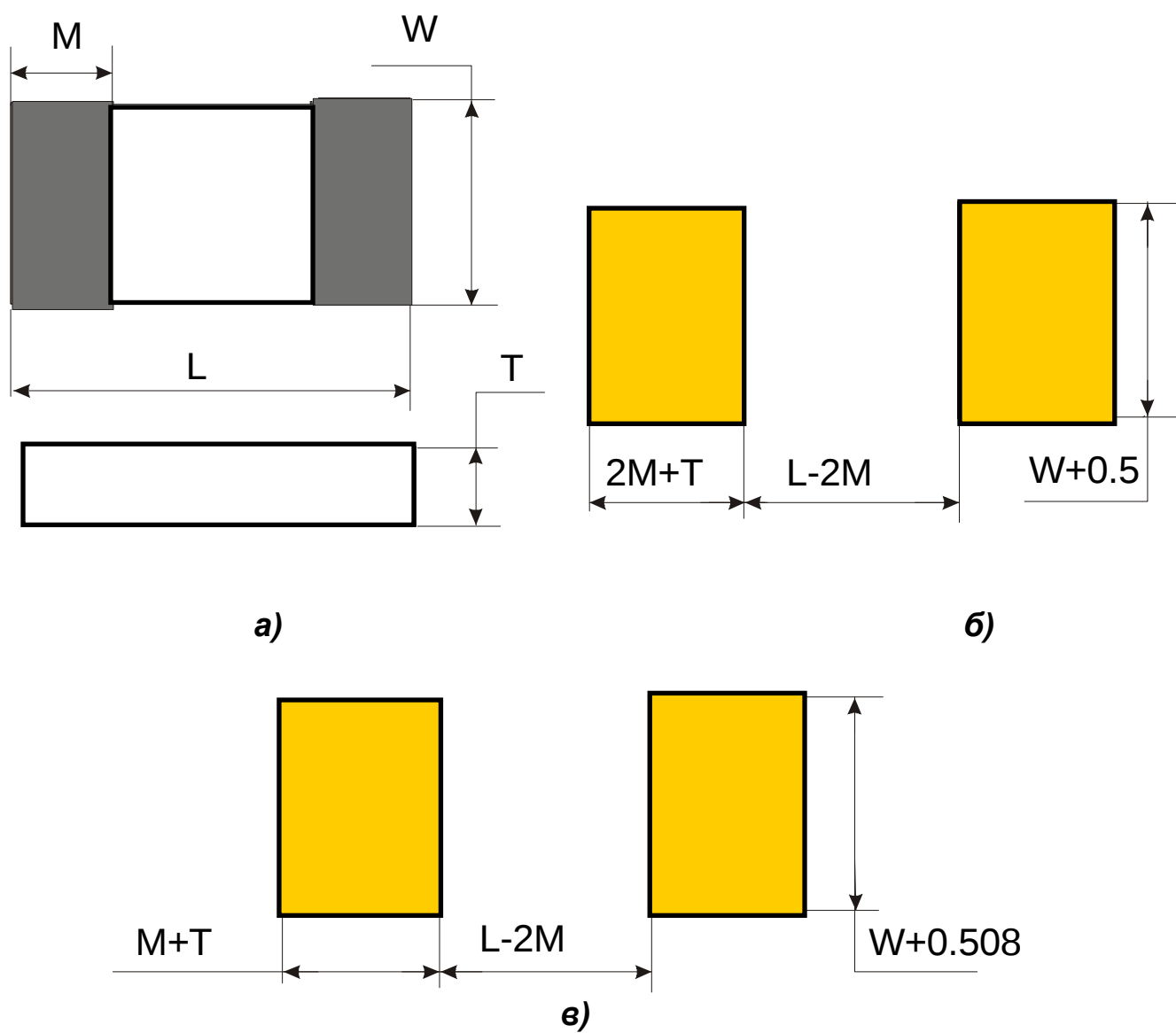


Рис. 11. Варианты знакоместа компонента

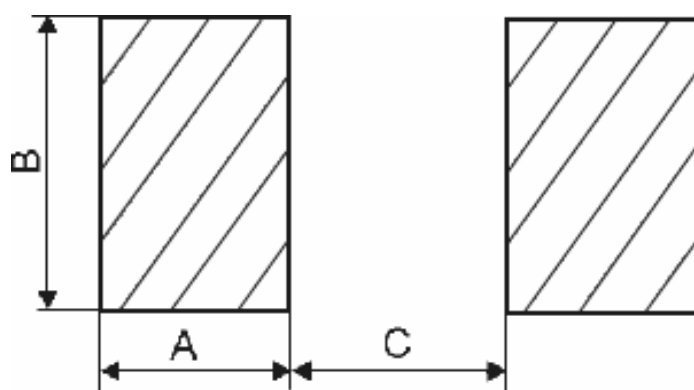


Рис. 12. Знакоместо под ЧИП компонент.

Для транзисторов в корпусе КТ-46 размеры знакоместа приведены на рис.13.

Размер окон трафарета для нанесения припойной пасты: $0,7 \times 0,7$ мм при толщине трафарета 0,3 мм. Для микросхем типа 43 в пластмассовом корпусе с двухрядным расположением выводов типа "крыло чайки" и шагом выводов 1,25 мм конструкция знакоместа для одного вывода приведена на рис.14.

На рис.14 сплошной линией изображена припойная площадка знакоместа, а пунктирной - контур площади соприкосновения вывода микросхемы с припойной площадкой. При толщине трафарета 0,3 мм для нанесения припойной пасты размеры окон трафарета должны быть $1,0 \times 0,5$ мм.

Для выбора проводников и зазоров проводящего рисунка коммутационной платы предлагаются следующие рекомендации:

- ширина проводников, которые подводятся к припойной площадке знакоместа компонента, не должна превышать половины стороны припойной площадки. Если по току такая ширина проводника не обеспечивает надежного функционирования схемы, то к площадке можно подводить более одного проводника с разных сторон. На рис.15 приведен пример подведения к припойной площадке трех проводников;

- расстояние между припойными площадками компонентов должно быть не менее 0,5 мм.

- расстояние между корпусами компонентов не должно быть меньше высоты самого высокого по высоте компонента.

На рис.16-22 и соответственно в таблицах 12 -16 приводятся габаритные размеры припойных площадок знакоместа для зарубежной элементной базы [12, 31] под различные методы пайки - расплавлением дозированного припоя, волной припоя.

При проектировании конструкции печатного рисунка монтажной платы с целью достижения качественной сборки печатного узла необходимо учитывать следующие правила, касающиеся топологии знакоместа:

- на поверхности припойной площадки не допускается ни одного переходного отверстия, в противном случае припой при контактировании будет стекать через переходное отверстие (рис.23). Переходные отверстия должны быть отделены от припойной площадки узким печатным проводником, выполняющим функцию тепловой блокировки, которая препятствует стеканию припоя с поверхности пайки в переходное отверстие;

- припойные площадки должны иметь одинаковые размеры с целью достижения симметричных натяжений в процессе пайки (рис.24). Соседние припойные площадки, подлежащие соединению, не могут соединяться по всей их ширине. Для этой цели должен использоваться узкий печатный проводник. В противном случае возникает опасность того, что компоненты сместятся в направлении, указанном стрелками, в экстремальном случае они могут сместиться настолько далеко, что противоположная контактная площадка компонента уже не будет располагаться на припойной площадке.

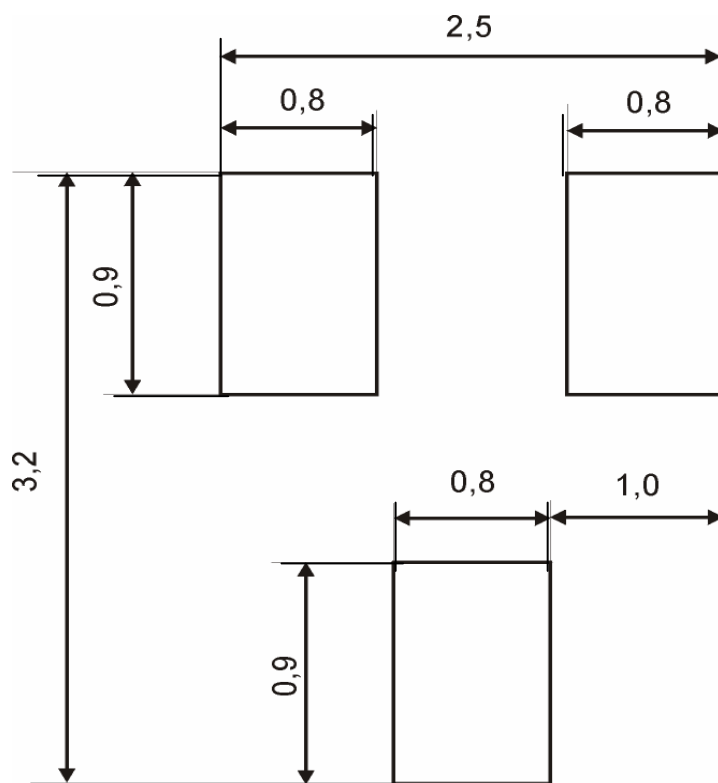


Рис. 13. Знакоместо транзисторов КТ - 46

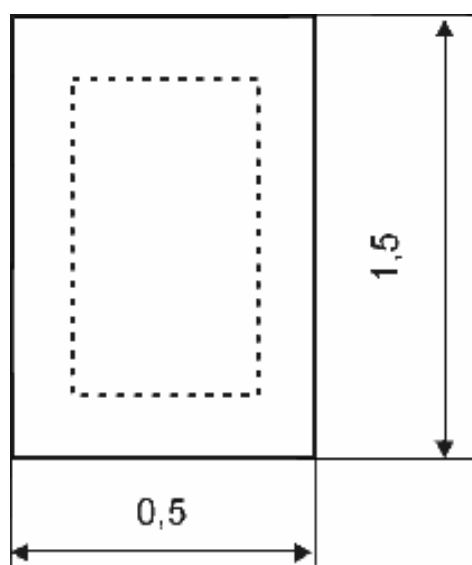


Рис. 14. Размеры площадки.

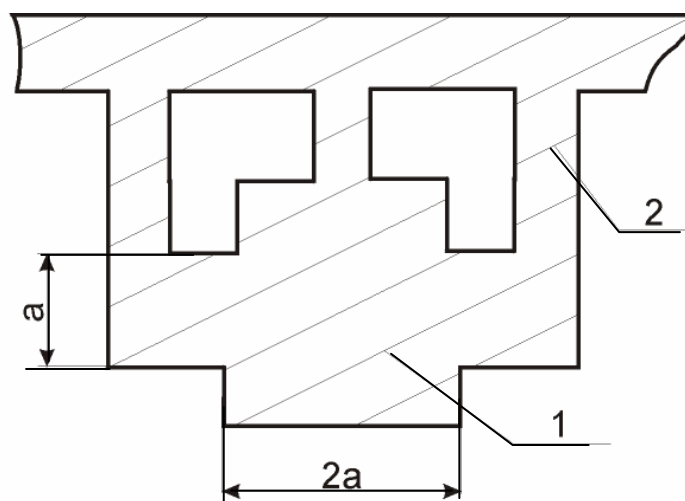


Рис.15.Соединение припойной площадки (1) с проводником (2).

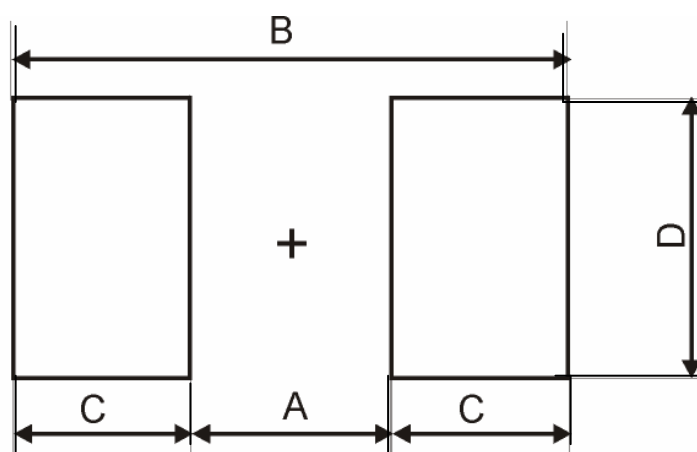


Рис. 16. Знакоместо простых корпусов (R и C) под метод расплавленного дозированного припоя.
(габариты приведены в таб. 12.)

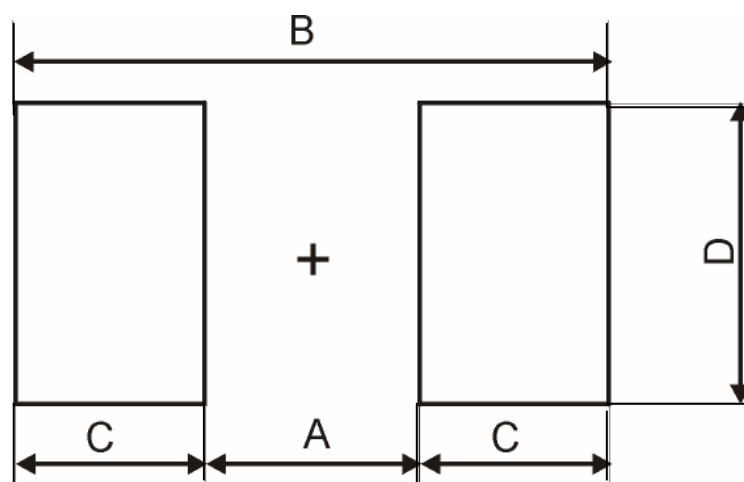


Рис. 17. Знакоместо для диода SOD-80.
(габариты приведены в таб. 13.)

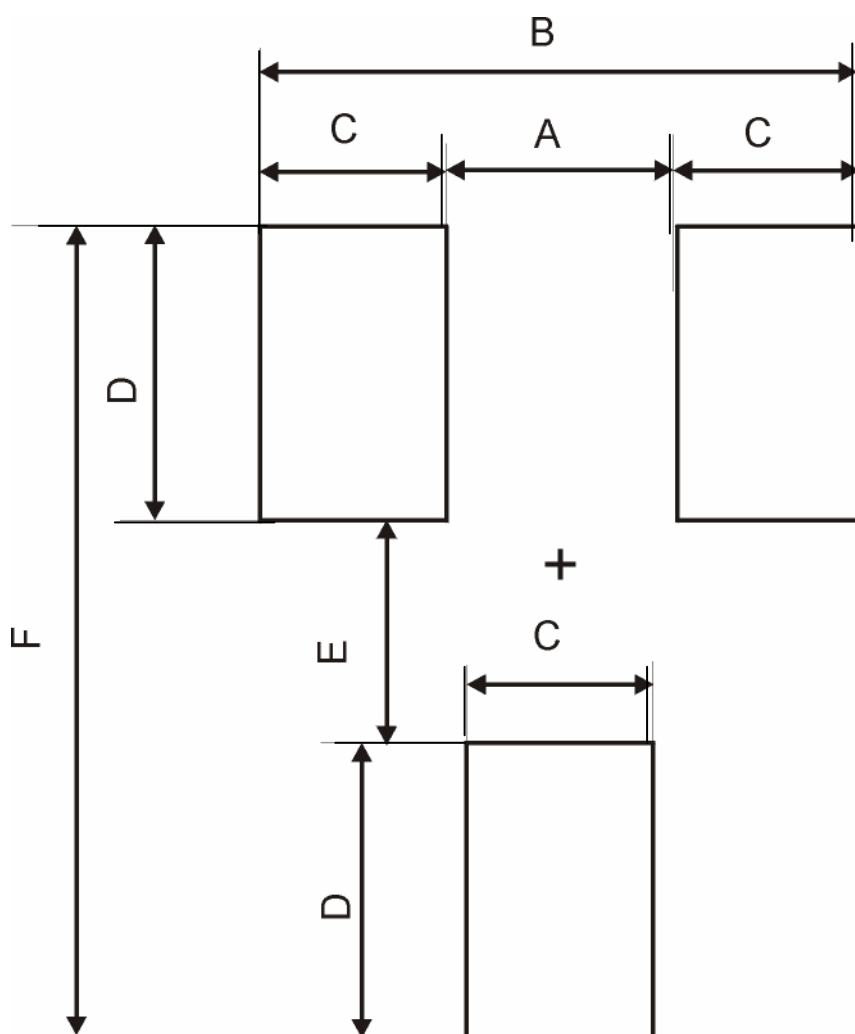


Рис. 18. Знакоместо для транзистора SOT-23
(габариты приведены в таб. 14)

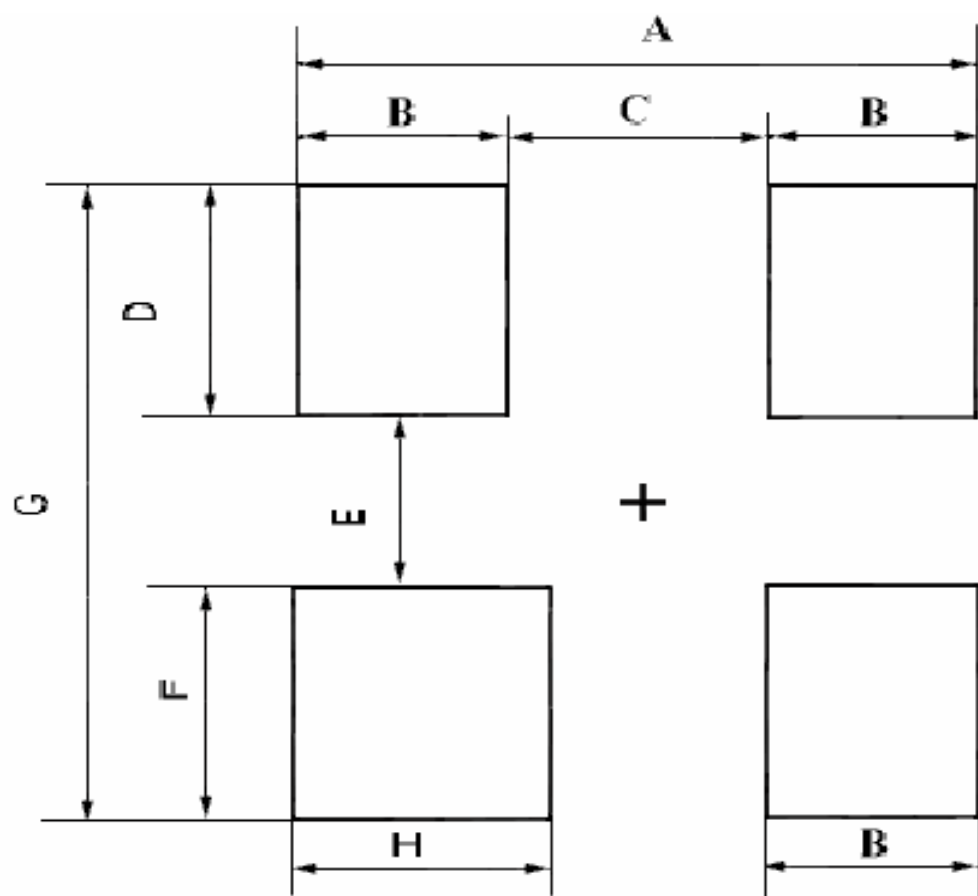


Рис. 19. Знакоместо для транзистора SOT - 143
(габаритные размеры приведены в табл. 15)

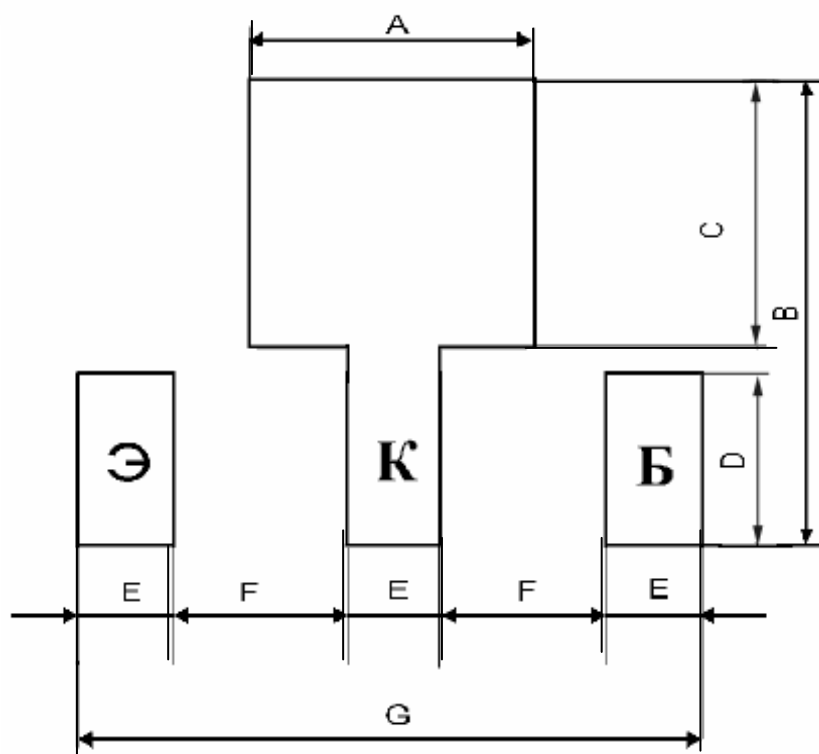


Рис. 20. Знакоместо для транзистора SOT-89
(габаритные размеры приведены в табл. 16)

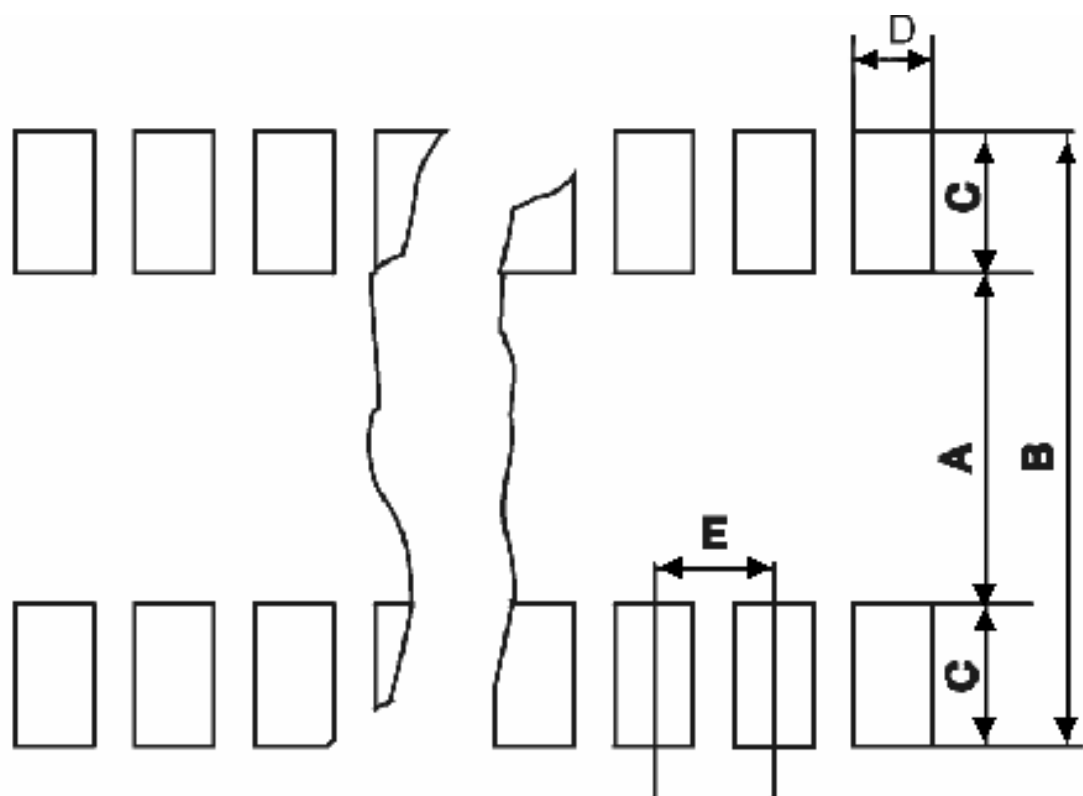


Рис. 21. Знакоместо для микросхем с различным количеством выводов.
(габаритные размеры приведены в табл.17)

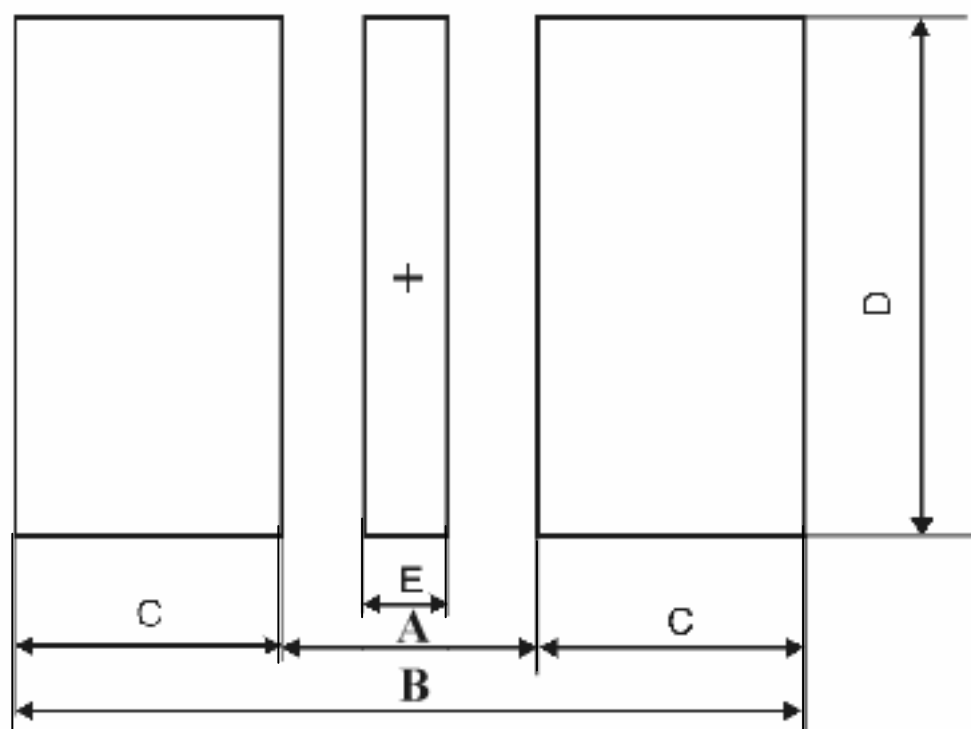


Рис. 22. Знакоместо для простых корпусов (R и C) под пайку волной припоя
(габаритные размеры приведены в табл.18)

Таблица 12

Тип	A	B	C	D
C0805	0,8	3,4	1,3	1,4
R/C1206	1,8	4,6	1,4	1,7
C1210	1,8	4,6	1,4	2,6
C1808	2,8	6,2	1,7	2,1
C1812	2,8	6,2	1,7	3,3
C2220	4,0	7,4	1,7	5,1

Таблица 13

Метод пайки	A	B	C	D
Дозированный припой	2,4	5,2	1,4	1,4
Волна	2,5	5,0	1,25	2,0

Таблица 14

Метод пайки	A	B	C	D	E	F
Дозированный припой	1,2	2,6	0,7	1,1	2,6	-----
Волна	0,8	3,4	1,3	1,3	1,2	3,8

Таблица 15

Методы пайки	A	B	C	D	E	F	G	H
Дозированный припой	2,6	0,7	1,2	0,9	1,1	0,9	2,9	1,1

Таблица 16

Тип	Размер, мм						
	A	B	C	D	E	F	G
SOT-89	2,0	4,6	2,6	1,2	0,8	0,7	3,8

Таблица 17

Тип Корпуса	Размер, мм				
	A	B	C	D	E
SO-8, 14,16	4,0	7,0	1,5	0,6	1,27
SOL-16, 20,24, 28	7,8	11,4	1,8	0,6	1,27

Таблица 18

Тип Корпуса	Размер, мм				
	A	B	C	D	E
C0805	1,2	3,6	1,2	1,2	0,4
R/C1206	2,0	4,8	1,4	1,4	0,5

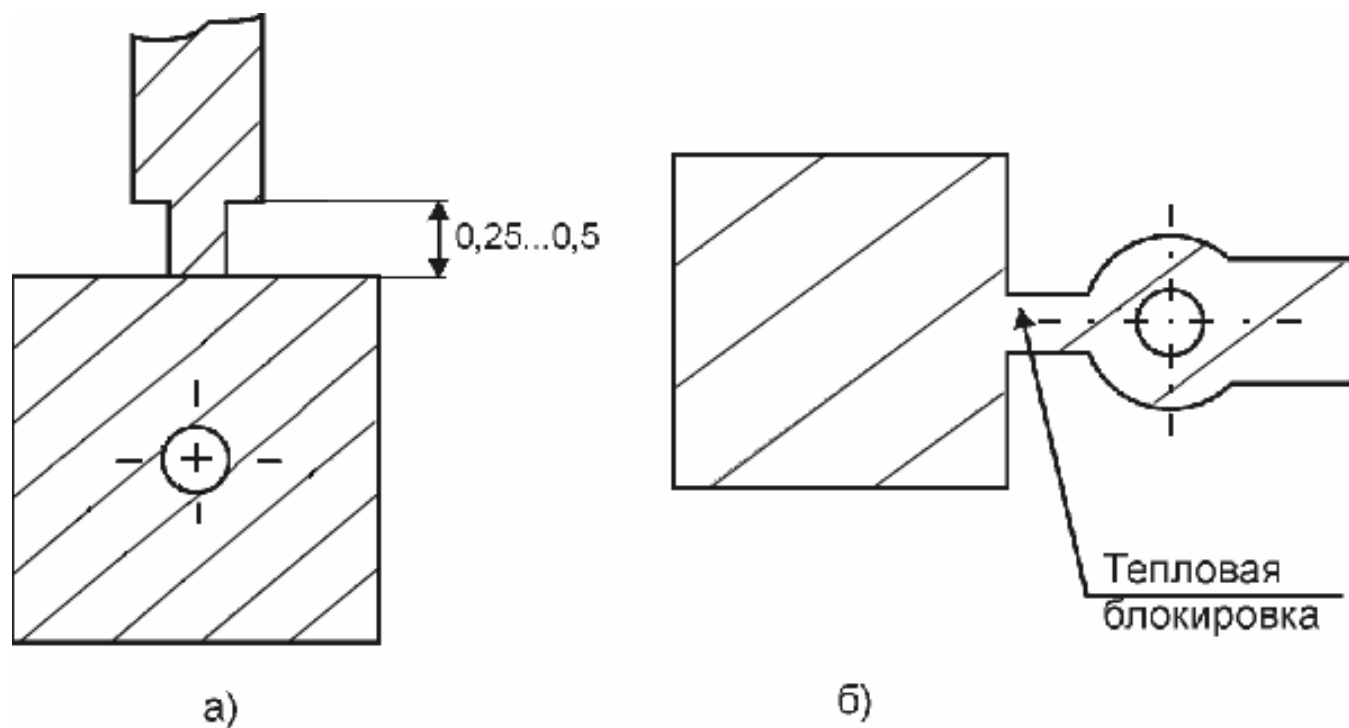


Рис. 23. Расположение переходного отверстия:
а) неверно; б) правильно

Приведенные выше ошибки, основанные в общей сложности на асимметрии припойных площадок, ошибочном выборе количества припоя или на избыточном количестве тепла, влекут за собой ухудшение качества контакта, снижение качества паяного соединения и возникновение так называемого эффекта "надгробного камня" (см. п.1.5).

Эти правила действуют в отношении печатных плат, рисунки печатных проводников которых заранее облужены. Они действительны, также, и в отношении печатных плат, изготовленных с использованием техники чернения, где исключается возможность стекания припоя с поверхности припойной площадки на печатные проводники, однако сохраняется фактор теплового воздействия. Таким образом, элементы термической блокировки являются обязательными в каждом случае. При нарушении этого правила возникает иногда эффект разворачивания компонента (рис.25,26).

1.5. Эффект " надгробного камня "

Под этим эффектом понимают опрокидывание или разворачивание в вертикальное положение конструктивного компонента, в основном чип-компонента прямоугольной формы в процессе пайки (рис.27). Причина возникновения этого эффекта, действующего только при пайке методом расплавления дозированного припоя, не в самой пайке, а главным образом в асимметрии действия сил между поверхностями А и В пайки, которая обусловлена следующими факторами:

- значительная асимметрия поверхностей пайки, в результате чего возникают различные количества припоя и различные величины поверхностного натяжения на поверхностях А и В;
- стекание припоя через ошибочное расположение переходного отверстия (правила раздела 1.4);
- плохая смачиваемость поверхности В в результате окисления или загрязнения поверхности пайки или вследствие того, что поверхность пайки частично покрыта защитным лаком;
- слишком большое количество паяльной пасты на поверхности А;
- неидентичность металлизации или смачиваемости поверхности пайки конструктивного компонента.

Для устранения этого эффекта, при наличии всех выше перечисленных факторов, можно воспользоваться клеем, который, кроме всего, увеличивает механическую прочность крепления компонента к печатной плате.

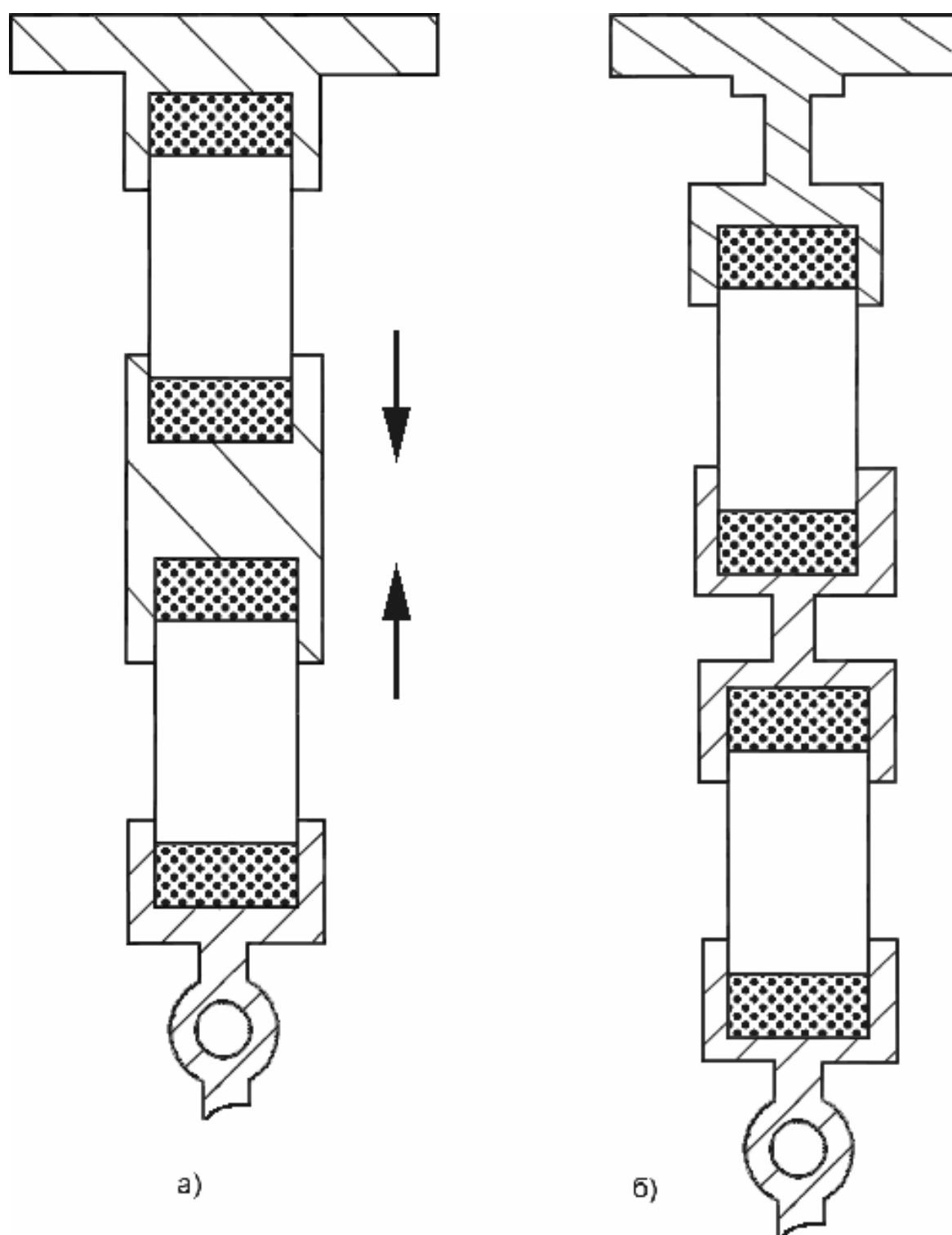


Рис. 24. Размеры припойных площадок
а)-ошибочно; б)-правильно.

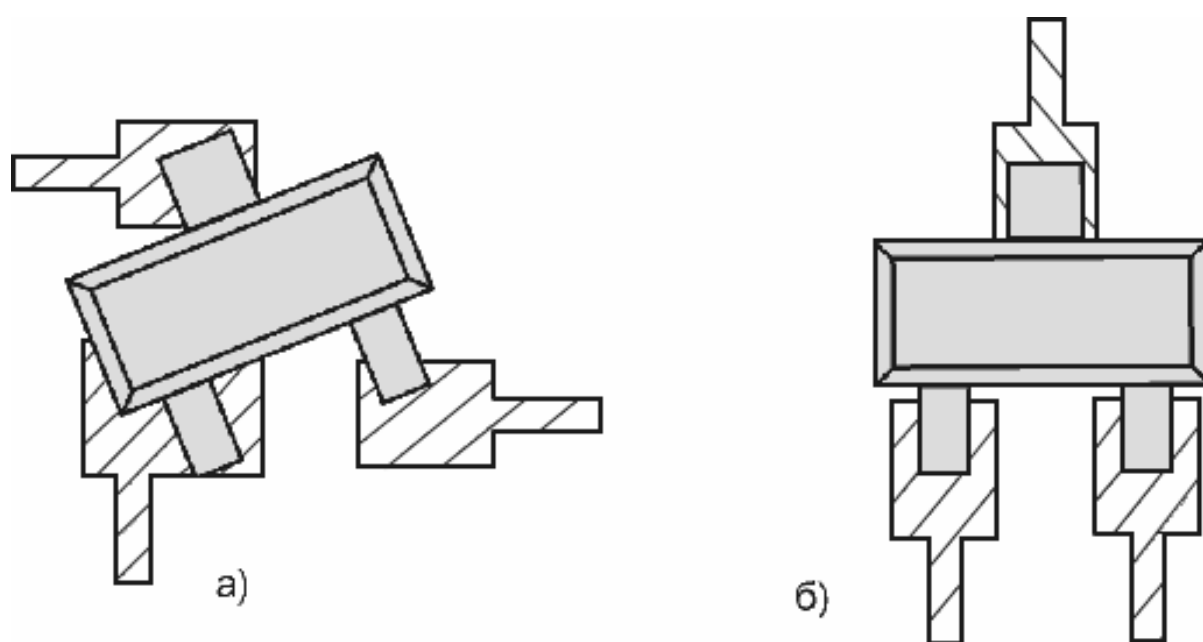


Рис. 25. Правило расположения транзисторов :
а - ошибочно; б - правильно

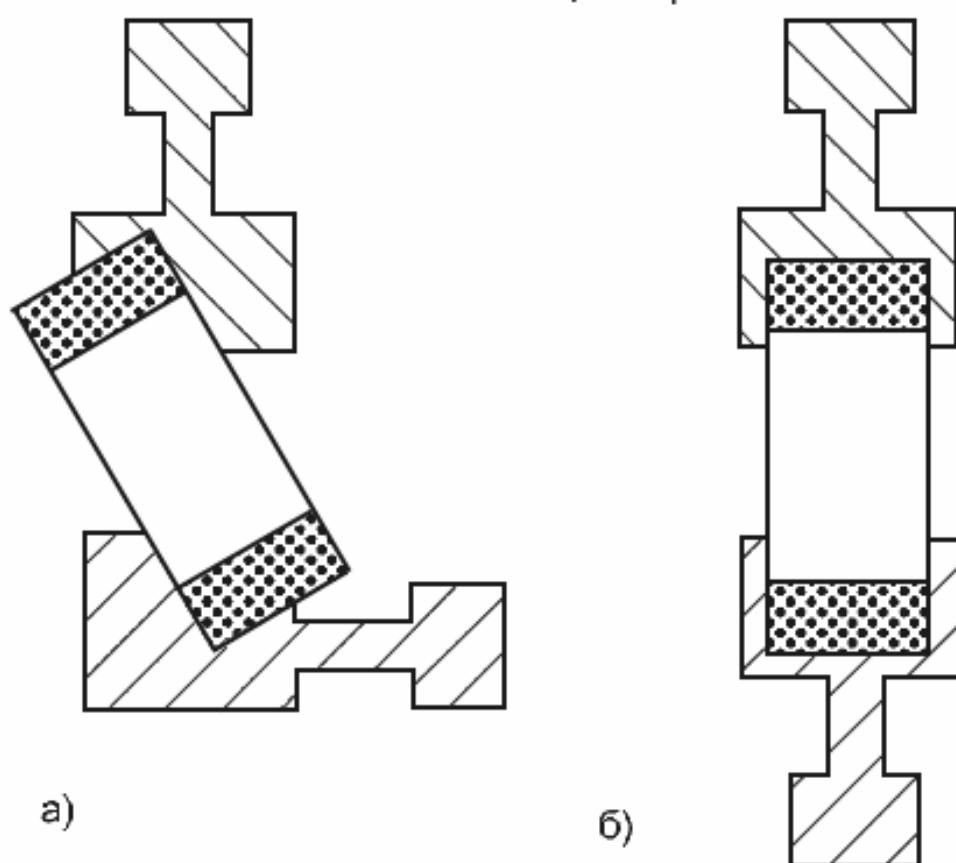


Рис. 26. Правило расположения чип - резисторов :
а - ошибочно; б - правильно

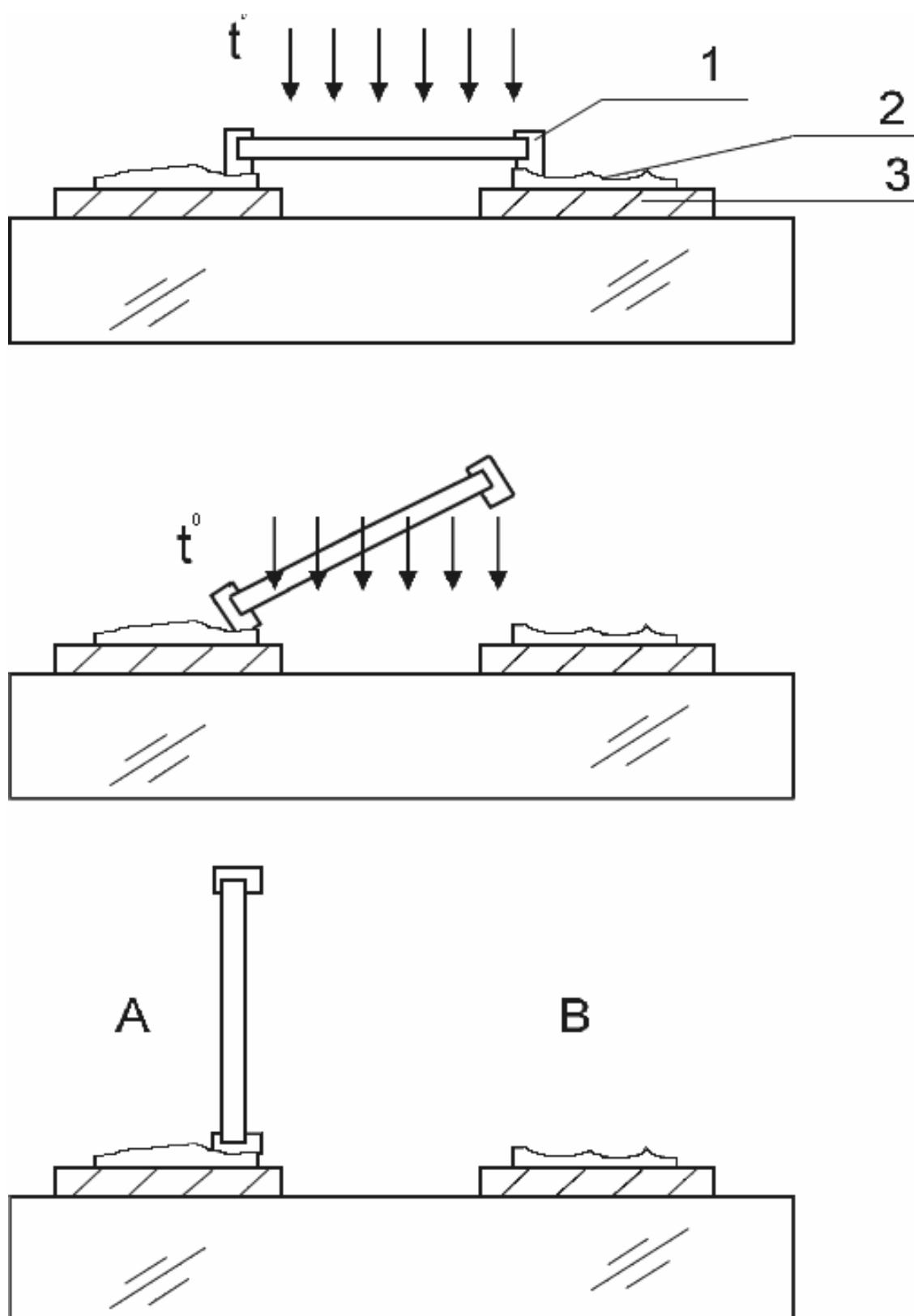


Рис. 27. Эффект "надгробного камня"

- 1-ЧИП компонент;
- 2-припойная площадка;
- 3-расплавляемый припой;
- 4 А, В-поверхности пайки;

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие требования предъявляются к компонентам для поверхностного монтажа?
2. Направления разработки компонентов для ТПМ.
3. Принципиальные отличия резисторов типа P1-11 и P1-12.
4. Способы пайки резисторов для ТПМ.
5. Достоинства чип-резисторов.
6. Способ поставки компонентов.
7. Какова кратность пайки резисторов, монтируемых на поверхность?
8. Допустимая максимальная температура припоя при пайке резисторов в ТПМ?
9. Приведите конструктивы компонентов в ТПМ.
10. Виды конденсаторов постоянной ёмкости.
11. Каковы отечественные представители активных компонентов?
12. Технологические особенности монтажа компонентов.
13. Основные недостатки отечественных компонентов.
14. Каким припоем необходимо паять конденсаторы K10-17В, если температура эксплуатации 85°C и выше?
15. Укажите причину применения припоя марки ПОСК 50-18.
16. Каков способ сборки для резисторов P1-12 мощностью 0,062 Вт?
17. Способы контактирования транзисторов и диодов на плате.
18. Марка пасты, применяемая для пайки транзисторов и диодов.
19. Особенности применения электролитических конденсаторов в ТПМ.
20. Что означает термин «крыло чайки»?
21. Что такое знакоместо в ТПМ?
22. Особенности при выборе топологии знакоместа.
23. Вариант знакоместа под отечественный чип-компонент при пайке в ИК-печи.
24. Какие рекомендации необходимо учитывать для выбора проводников и зазоров в печатном рисунке?
25. Правила, необходимые при проектировании конструкции знакоместа и печатного рисунка.
26. На что влияет тепловая блокировка?
27. Почему нельзя сверлить переходные отверстия в припойных площадках?
28. Какие правила проектирования знакоместа имеют место для печатных плат с облуженными проводниками и изготовленными по технике чернения?
29. Чем обусловлен эффект разворачивания компонента на расплавленном припое при контактировании на печатной плате?
30. Что такое эффект «надгробного камня» и причины его появления?

2. МОНТАЖНЫЕ ПЛАТЫ

При использовании миниатюрных компонентов для поверхностного монтажа достигается возможность более высокой плотности монтажа. При увеличении лишь в два раза количества компонентов на той же площади, неизбежно возникает необходимость в использовании более узких печатных проводников и расстояний между проводниками. Увеличивается также удельная тепловая нагрузка, и возникают различные условия теплового расширения в области между компонентами и печатной платой, которые отличаются от условий стандартной (DIP) технологии, где они компенсируются за счет гибких выводов. Все эти положения должны учитываться уже при разработке схемы и при проектировании конструкции платы на основе следующих факторов:

- плотность монтажа;
- термическая нагрузка;
- способ комплектации компонентов (ручной или с помощью автоматов);
- метод пайки;
- установка компонентов с одной стороны или с обеих сторон, наличие переходных отверстий;
- вариант монтажа платы (чисто поверхностный, смешанно - разнесенный или смешанный);
- величина напряжения и тока.

2.1. Конструкция печатного рисунка

Конструкция печатного рисунка определяется конструкцией припойных площадок знакоместа компонента и геометрией печатных проводников.

Геометрия печатных проводников определяется исходя из требования хорошего теплоотвода рассеиваемой мощности активными и пассивными компонентами, что приводит к увеличению ширины проводников, а требование высокой плотности монтажа неизбежно ведет к уменьшению ширины печатных проводников и расстояний по сравнению с обычной технологией.

Современная технология позволяет достигнуть ширины проводников и расстояний между ними в 150 мкм и менее. Ширина 0,25 мм и более относится к стандартной технике (рис.28); 0,15 мм - к технике тонких проводников (рис.29); 0,08 мм - к технике тончайших проводников (рис.30).

Конструкция припойных площадок знакоместа определяется главным образом формой контактной площадки самого компонента и является, в большинстве случаев, прямоугольной.

Размер знакоместа определяется следующими факторами:

- размерами самого конструктивного компонента;
- методом комплектации компонентов;
- методом пайки;

Расчеты размеров припойных площадок знакоместа, рекомендуемые автором в ТПМ, подробно приведены в главе 1 для инфракрасной пайки (ИК - пайки), а также ручной комплектации с использованием оптических вспомогательных средств.

2.2. Технология изготовления печатных плат

Все большее распространение при создании радиоэлектронных средств получают методы формирования печатного рисунка на основе аддитивной технологии, которая в большинстве случаев обеспечивает более высокую надежность ПП, чем традиционные методы. Плата, изготовленная по аддитивной технологии, представляет собой планарную конструкцию с нанесенной в местах отсутствия маски (в окнах маскирующего слоя) медью, осаждаемой вровень с фоторезистом (рис.31).

Применяемая в DIP-технологии, стандартная - субтрактивная технология приводила к рельефному рисунку, когда медные проводники выступали над поверхностью платы, что вызывало следующие дефекты:

- пузырение защитного покрытия медных проводников;
- отслаивание фольги;
- возможность скопления припоя и флюсов в результате попадания их в пустоты (рис.31);
- возможность появления перемычек припоя при пайке;
- появление газовых полостей после лужения.

Известно [13,26], что аддитивная технология позволяет создавать конфигурацию более узких проводников и зазоров между ними, чем традиционная и тем самым перейти к технике тонких и тончайших проводников, что весьма положительно сказывается при достижении основной задачи конструктора-технолога РЭС - микроминиатюризации. А применение дополнительной защитной (стоп) маски исключает скопление, затекание припоя и формирование перемычек между припойными площадками при любом методе пайки.

2.3. Материалы для изготовления плат

Более двадцати лет в радиоэлектронной промышленности при изготовлении печатных плат (ПП) использовались практически одни и те же широко известные материалы – покрытые медной фольгой слоистые пластики на основе пластмасс, твердеющих при термообработке (фенольная пластмасса, эпоксидная смола или полиимидная основа, усиленная бумагой или стекловолокном). Однако эти материалы не могут полностью удовлетворить все требования, предъявляемые к ТПМ. Необходимость комплексного решения вопросов обеспечения тепловых режимов, высокого быстродействия аппаратуры (от 30 до 300 МГц), совместимости ПП и безвыводных керамических компонентов по ТКЛР, механической жесткости основания во избежание дополнительных напряжений при деформации ПП в процессе сборки, транспортирования и др., явилась причиной поиска и разработки новых материалов для изготовления ПП, характеристики которых приведены в табл.19 [51].

Преобладающим материалом для ПП являются [13]: слоистые стеклоэпоксидные, бумажно-эпоксидные или слоистые бумажно-фенольные материалы, как более дешевые. Довольно распространенным для изготовления ПП также является полиимид, который считается одним из перспективных материалов, поскольку позволяет уменьшить задержку распространения сигнала (диэлектрическая проницаемость составляет 3,5; у керамики - 10), получить проводящие дорожки шириной 25 мкм с шагом 75 мкм и сквозные отверстия диаметром 50 мкм (для межслойных соединений многослойных ПП). Из-за невысокой теплопроводности полиимид чаще применяют в сочетании с другими материалами, например, кварцем.

Металлизацию на ПП создают с помощью всевозможных паст, а также элементов толсто пленочной технологии. В частности применяют органические смолы с дисперсированием частиц меди. При нагреве лучом лазера происходит термическое разложение отвержденной смолы, при этом частицы меди сплавляются, образуя проводящую линию шириной 0,12-0,14 мм. Такие дорожки имеют более низкое удельное сопротивление, чем толсто пленочные проводники на основе паст, содержащих палладий или серебро. Данная технология позволяет непосредственно на эпоксидной смоле изготавливать кроме проводников еще и резисторы. В этой технологии используют алюминиевые подложки, покрытые изолирующей пленкой смолы (толщиной 0,15 мм), и эмалированные стальные платы, что обеспечивает хороший теплоотвод.

Некоторые компании [13] предлагают многослойные (10-50 слоев) керамические ПП с встроенными пассивными элементами. Отдельные слои такой ПП представляют собой листы неотожженной керамики толщиной 50-80 мкм с нанесенным на них печатным рисунком проводников, резисторов, конденсаторов, отжигаемых одновременно при температуре ниже 1173°K . Многослойная керамическая ПП не содержит отверстий; разводка печатных проводников выполнена с двух сторон платы и обеспечивает монтаж компонентов на поверхность. Повышение удельной емкости встроенных конденсаторов по данной технологии возможно при использовании очень тонких слоев керамики (менее 50 мкм) с более высокой диэлектрической постоянной, например, получаемых из смеси вольфрамата свинца-железа, ниобата свинца-цинка или ниобата свинца-железа. По мнению разработчиков, такие ПП имеют один недостаток - ограниченные размеры, в остальном они перспективны и экономически выгодны.

При использовании керамических компонентов, монтируемых на поверхность, проявляется значительная разница в ТКЛР. Так, ТКЛР широко известных материалов платы $(14-18) \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$, а керамического компонента $(5-7) \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. Более чем трехкратное расхождение в ТКЛР приводит к развитию механических напряжений, способствующих появлению микротрещин в паяных соединениях и последующим отказам соединений, или нарушению целостности керамического носителя при термоциклировании.



Рис. 28. Стандартная техника



Рис. 29. Техника тонких проводников



Рис. 30. Техника тончайших проводников

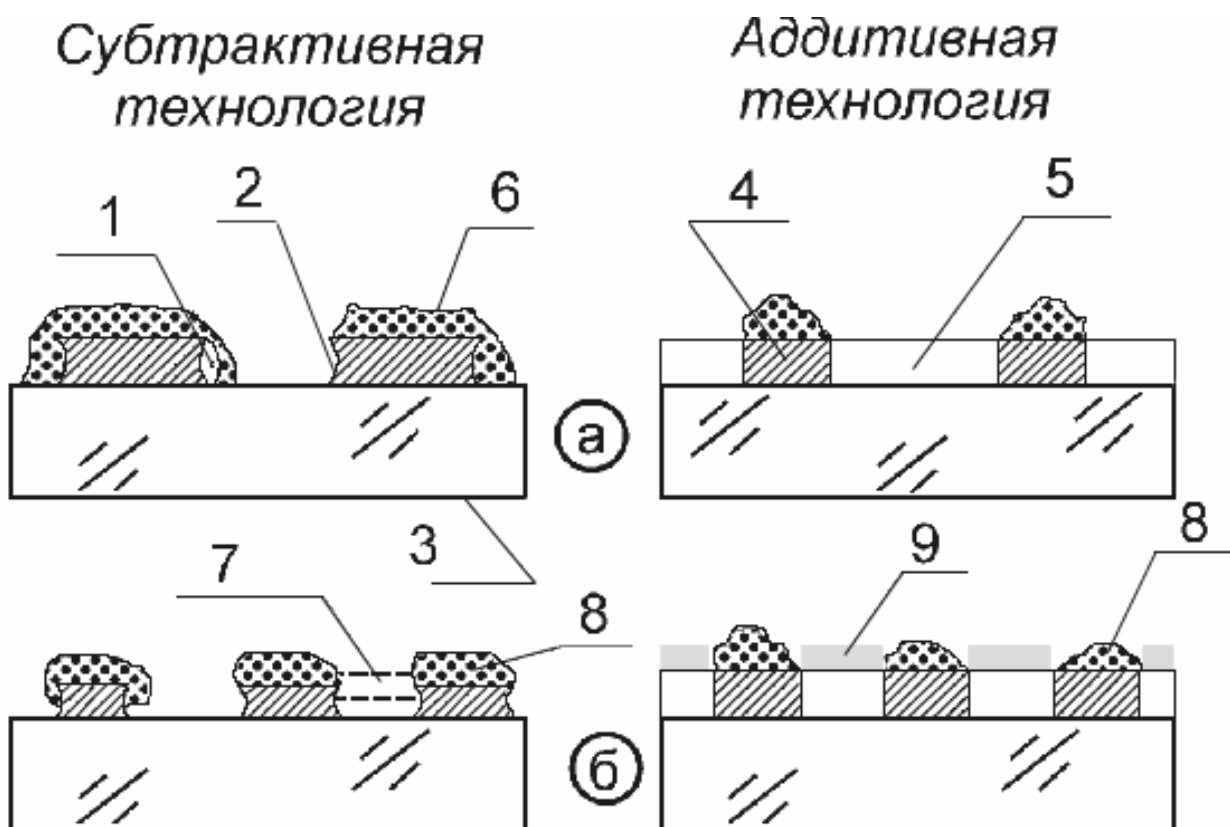


Рис. 31. Сравнение субтрактивной и аддитивной технологии изготовления ПП:
а-формирование печатного рисунка с припойным покрытием;
б-дозированное нанесение припоя на плату перед пайкой компонентов;
1-газовая полость после нанесения припоя;
2-отсутствие припоя;
3-основание платы;
4-медь;
5-резистивно-маскирующее покрытие;
6-припойное покрытие;
7-перемычка припоя;
8-конфигурация припойной площадки с припоем после его оплавления;
9-защитная (стоп) маска.

Таблица 19

Материал	Диэлектри- ческая Проницае- мость	ТКЛР 10^{-6} град ⁻¹	Теплопро- водность Вт/м*град	Применение
Эпоксидная смола- стекло- волокно	4,5 - 5,0	14,0-18,0	0,16	Для изделий бытовой техники, схемы широкого по- требления
Полиимид- стеклово- локно	4,5 - 5,0	15,0-18,0	0,38	Специальные изделия с повышен- ной плотностью мон- тажа
Эпоксидная смола- кевлар	4,0 - 4,5	5,3 - 5,6	0,12	Маломощные, работающие в условиях повышен- ной температуры из- делия
Полиимид- кевлар	3,5 - 3,6	5,6 - 5,8	0,15	Мощные быстро- действующие устройства
Фторопласт- Стеклово- локно	2,5 - 3,5	8,0	0,25	Быстродействующие и СВЧ- устройства
Эпоксидная смола-кварц	3,6	5,0	0,17	Устройства средней и повышен- ной мощности, СВЧ устройства, эксплуа- тируемые в условиях повышенных темпе- ратур
Полиимид- кварц	3,4	6,0-8,0	0,20	Мощные устройства, эксплуатируемые в условиях высоких температур
Эпоксидная смола- графит	...	3,0	1,00	Для согласования по ТКЛР монтируемых элементов и КП

Таблица 19 (продолжение)

Материал	Диэлектрическая Проницаемость	ТКЛР 10^{-6} град ⁻¹	Теплопроводность Вт/м*град	Применение
Термопластики (полисульфан, полиэфиримид, полиэфирсульфон, стеклоэпоксиды)	2,8-3,2	20,0	0,16	Изделия, выполняемые по спецтехнологии, прозрачные платы для дисплеев, устройства цветного кодирования, рельефные, объёмные сложной формы и другие уникальные коммутационные структуры
Стальная эмалированная подложка	6,8	12,0	1,00	Устройства различного назначения, в том числе мощные
Медь – инвар – медь	...	6,4-5,8	16,00	Для более точного согласования по ТКР всех элементов КП
Сплав ALLOY 42	...	5,3	15,00	...
Тефлон	2,1	Нет Данных	Нет данных	СВЧ устройства для согласования элементов по ТКР
Медь	...	17,3	450,0	Мощные устройства
Окись алюминия	9,0-10,0	6,5	25,0	Устройства, работающие при высоких температурах
Окись бериллия	6,0-7,0	8,00	230,0	Мощные устройства, а также специальные
Карбид кремния	6,0-7,5	0,5	230,0	Мощные и специальные устройства
Нитрид алюминия	Менее 5,0	0,5	Более 200,00	Мощные и СВЧ устройства для МЭА, работающие в экстремальных условиях

Таблица 19 (окончание)

Материал	Диэлектрическая Проницаемость	ТКЛР 10^{-6} град ⁻¹	Теплопроводность Вт/м*град	Применение
Политетрафторэтилен со спецнаполнителем	2,44	Лучше чем у полиимидного материала	Лучше чем у полиимидного материала (~46,00)	СВЧ схемы с минимальными перекрёстными помехами. Используется как эластомер – уплотнитель для изделий, работающих в условиях повышенной влажности

Печатные платы для монтажа керамических компонентов, как наиболее широко распространенных, должны обеспечивать компенсацию механических деформаций в паяных соединениях, вызванных различием ТКЛР платы и корпусов компонентов, достаточно хорошую теплопроводность материала основания; механическую жесткость основания во избежание дополнительных деформаций паяных соединений при деформации основания.

В настоящее время усилия специалистов направлены в основном на решение проблемы обеспечения совместимости ПП по ТКЛР с безвыводными керамическими компонентами. Наиболее перспективными направлениями являются следующие [11,13,25,51]:

- плата с металлической основой, имеющая низкий ТКЛР;
- эпоксидные и полиимидные многослойные подложки, армированные кварцем, графитовым или фирменным волокном Kevlar фирмы Du Pont;
- гибкие и эластомерные покрытия, наносимые на поверхность обычных многослойных материалов;
- нанесение бугорков припоя на контакты керамических компонентов для увеличения высоты слоя припоя.

К наиболее значительным работам в области создания ПП с металлической основой следует отнести платы, выполненные по методам Microwire, Lampac, Pactel, а также по тонкопленочной технологии на металлических основаниях, покрытых фарфоровой эмалью.

Платы, выполненные по методу Microwire, предназначены для монтажа на поверхность керамических компонентов с выводами в виде контактных площадок.

В этой конструкции платы используется изолированная медная проволока диаметром 63 мкм, монтируемая с шагом 315 мкм. Эта тонкая проволока погружается в адгезионный слой, расположенный сверху пластмассовой подложки с металлическим основанием, ТКЛР которого почти совпадает с ТКЛР керамических компонентов. Конструкция ПП позволяет добиться плотности компоновки, соизмеримой с плотностью толстопленочных гибридных схем. Металлизированные сквозные отверстия платы могут быть использованы для отвода тепла от верхнего слоя к нижнему металлическому основанию платы. К недостаткам Microwire следует отнести возможность монтажа компонентов только с одной стороны и сложность в изготовлении самих плат.

Платы, выполненные по методу Lamras, были разработаны в целях повышения плотности компоновки при монтаже корпусов типа DIP; при этом рассматривалась возможность использования для монтажа безвыводных компонентов. Метод изготовления ПП Lamras включает в себя три этапа:

1. Изготовление металлического основания.
2. Создание коммутационных схем.
3. Напрессовку коммутационной схемы на металлическое основание.

Используя этот метод, фирма разработала и предложила слоистую структуру, состоящую из покрытой диэлектриком стальной платы-основания с расположенной на ней двусторонней стеклоэпоксидной ПП. Эта составная плата, имеющая ТКЛР, близкий к ТКЛР компонента, позволяет отделить проводящий рисунок от стальной основы, которая одновременно выполняет функции несущей конструкции, заземления и теплоотвода. Печатные проводники располагаются по обе стороны тонкой верхней платы и соединяются между собой с помощью проводников через сквозные отверстия диаметром 0,275 мм. Это дает существенную экономию площади платы, в результате чего две стороны платы Lamras по числу соединений эквивалентны восьми слоям обычной многослойной схемы.

По технологии Rastel изготавливаются многослойные ПП (МПП) с шириной проводников и расстояний между ними 75-100 мкм. Высокая плотность размещения проводников достигается благодаря тому, что межслойные столбики в сечении имеют размер 100 x 100 мкм и могут выполняться между определенными слоями. На остальных слоях освобождающаяся площадь используется для прокладки дополнительных проводников. С помощью аддитивного процесса металлизации последовательно образуется несколько слоев. Последней операцией является напрессовка многослойной структуры на металлическое основание - теплоотвод. Максимальное число проводящих слоев платы равно шести при общей толщине платы 0,46-0,51 мм. В качестве материала основания используется алюминий или инвар, плакированный медью.

Значительное место при изготовлении ПП, предназначенных для ТПМ, занимают платы, выполненные по методу толстопленочной технологии на металлическом основании, покрытом слоем эмали.

Присущие металлу свойства: обрабатываемость, прочность, теплопроводность, стабильность размеров, магнетизм, способность к электромагнитному экранированию, позволяют получать у оснований плат совершенно новые характеристики, которые трудно достижимы у традиционных материалов для изготовления ПП. Основная проблема заключается в изготовлении изолирующей основы из металла основания, который является проводящим материалом. В зависимости от технологии были предложены различные материалы и методы.

Накопленный к настоящему времени опыт создания, и применения металлических подложек свидетельствует о наличии нерешённых проблем и отсутствии оптимального решения. Поэтому актуальным является анализ преимуществ и недостатков металлических подложек, рассмотрение их конструктивных и технологических возможностей, выбор перспективных направлений.

Первыми начали изготавливать стальные покрытые эмалью подложки размером до 51×51 см фирмы Erie Ceramic Arts Co и Alpha Advanced Technology [33]. На эти подложки фирмы Electro Materials Corp и Du Pont наносят разработанные ими неорганические толстопленочные пасты для изготовления проводников, резисторов и диэлектриков. Наносят их через трафарет и вжигают при $t^0=600-700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В конструкциях из стали с фарфоровым покрытием плата выполнена из тонкого листа (0.7...0.81мм) мягкой низкоуглеродистой стали. На одну или обе стороны листа после предварительной обработки наносят методами окуна-ния, пульверизации, электрофореза, экранированного печатания слой фритты регулируемой толщины (0.18...0.25мм). Безщелочная стеклянная фритта готовится из кварца, полевого шпата с керамическими наполнителями. Оптимальный состав фритты в молярных процентах: 40...75 P_2O_5 и 20...55 смеси из K_2O , ZnO , B_2O_3 или Al_2O_3 (<20 %) и CaO , BaO (<55%). После нанесения фритта вжигается в течение 1...3 мин при $t^0=973...1173\text{ }^{\circ}\text{K}$ в зависимости от технологии в печи непрерывного действия. В результате на поверхности стали, образуется эмаль - стекловидное покрытие толщиной 100...150 мкм. Затем наносят проводящую пасту, из которой формируется проводящий рисунок. В качестве проводящей пасты служит стеклянная фритта с включённым в неё металлическим порошком. Паста вжигается в эмаль при температуре 923 $^{\circ}\text{K}$. Присущая эмали пористость в результате термоудара при вжигании вызывает появление микро - и макротрещин, что является характерным недостатком этих плат.

Конструктивно подложка может быть изготовлена в виде сплошного глазированного покрытия или совместно с внутренними соединительными проводниками и контактными площадками, запрессованными в слой эмали. На таких подложках могут быть выполнены модули больших размеров для высокоплотных ПП или гибридных интегральных схем (ГИС), работающих в условиях повышенных температур и предельных ударных нагрузок. Подложку можно отлить и изогнуть перед нанесением фарфора, так чтобы получилось самоподдерживающее шасси. Подложка обеспечивает прочную основу для монтажа сравнительно тяжёлых металлических изделий (таких, как трансформаторы); её

можно свернуть для получения эффективного внутрисхемного электростатического экрана. Но из-за высокой диэлектрической проницаемости эмали использовать эти платы на высоких частотах трудно.

Технология изготовления плат (сталь, покрытая фарфором) подробно описана в [53,54] и использует стандартные методы изготовления ПП с применением гибридной технологии. Например, печать со сквозными отверстиями, монтаж проводами, пайку волной припоя, двустороннюю печать и др. Заслуживает внимания процесс штамповки отверстий без острых заусенцев. В [53] описан вариант штамповки при одновременном применении двух штампов, или калибрующих пуансонов, представляющих собой зеркальное отражение друг друга.

Платы на стальных эмалированных подложках имеют ряд преимуществ по сравнению с платами, изготовленными с использованием полимерных толстоплёночных паст. Во-первых, при их изготовлении можно применять пасту на основе окиси рутения, имеющую более низкий температурный коэффициент, чем полимерные толстоплёночные пасты, содержащие в качестве наполнителя углерод. Во-вторых, к стальной подложке легче осуществить приварку проводочных выводов или пайку волной припоя, чем к тем подложкам, в которых применяются полимерные толстоплёночные пасты.

Если это необходимо, то на покрытые эмалью стальные подложки можно наносить и вжигать толстоплёночные пасты с медным наполнителем, легко поддающиеся пайке [17]. Однако существуют определённые проблемы, связанные с изготовлением и эксплуатацией таких плат. Одна из них - миграция ионов под воздействием нагрева в электрическом поле, что приводит к возникновению тока утечки в функционирующей микросхеме. Другая техническая проблема состоит в окислении проводников из сплава, содержащего серебро, происходящим на краях подложки, где эти проводники могут оказаться в контакте со стальной основой. Кроме того, эмаль не отличается стойкостью ко многим химическим реактивам, что затрудняет её использование [55].

Для обеспечения повышенной теплопроводности ПП предлагается выполнять из алюминиевого основания и стеклоэмали на его поверхности, выполняющей функцию электроизоляционной подложки. Высокая адгезия стеклоэмали к металлическому основанию и их согласование по ТКЛР обеспечиваются специальным патентуемым составом подслоя эмали на основе алюминия. Основной компонент подслоя - сплав силумин с содержанием 5% кремния. Концентрация кремния, подобранная эмпирически, обеспечивает мелкозернистую структуру сплава, что гарантирует его минимальную пористость и пластичность. В [28] приведены 9 вариантов составов сплава подслоя.

В [29] рассматривается подложка, состоящая из металлической основы из ферроникелевого сплава (20-90 %), на обеих поверхностях которой последовательно сформированы слои из меди или медного сплава и эмалированный слой. На площадках, предназначенных для поверхностного монтажа элементов, удаляется эмалированный слой. Элементы могут монтироваться на эмалированной поверхности заполненного эмалью сквозного отверстия подложки. В обоих

случаях исключена возможность разрушения или отслаивания монтируемого элемента. Для повышения адгезии элемента к поверхности медного слоя рекомендуется формировать тонкий поверхностный металлический слой, предотвращающий окисление меди.

Однако использование сталей в качестве материала основания платы не дает положительных результатов, так как ТКЛР стальных эмалированных оснований колеблется в пределах $(2-30) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$. Для этой цели перспективен композиционный материал на основе инвара, покрытого с двух сторон медью. В [51] говорится, что подобный материал основания, покрытый слоем фарфоровой эмали, наилучшим образом согласуется по ТКЛР с компонентами при хороших тепловых характеристиках плат.

Для изготовления плат из стеклоэпоксидных и стеклополиимидных диэлектриков, пригодных для монтажа безвыводных керамических компонентов, предлагаются многослойные конструкции, в которых диэлектрические слои чередуются со слоями из композиционных металлических материалов (металлических сердечников [13]). Наиболее широко проводятся работы по использованию в качестве таких материалов сплава Alloy 42, молибдена, инвара, плакированных медью, сплава Kevlar, а также покрытого фарфоровой эмалью инвара.

В табл. 20 приведены ТКЛР различных материалов, применяемых для изготовления ПП, совместимых с безвыводными керамическими компонентами, ТКЛР которых равен $(5-7) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$.

Как видно из табл. 20, идеальным материалом в качестве сердечника для стеклоэпоксидной и стеклополиимидной плат является сплав Alloy (никель 42 % и железо 58 %). Исследования показали, что МПП, включающая два слоя из сплава толщиной 0,127 мм, имеет ТКЛР $(7-8) \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$. Испытания на термоциклирование изделий в диапазоне температур от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$, содержащих безвыводные керамические компоненты с числом выводов 14, 24, 32, 44 и 46, подтвердили совместимость указанных ПП и компонентов по ТКЛР.

Таблица 20

Материал	ТКЛР* $10^{-6} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$
Сплав Alloy 42	5
Инвар, плакированный медью	4-8
Молибден, плакированный медью	5
Волокно Kevlar	-2- +4
Кварцевое волокно	0,54
Стекловолокно	4-5
Стеклоэпоксидный пластик	12-16

Более высокую устойчивость к термоциклированию получили платы после замены сплава Alloy 42 инваром, с обеих сторон плакированного медью. Инвар - это железоникелевый сплав (никеля 36 % и железа 64 %). Предлагаются два варианта конструкций плат с использованием этого материала. В первом случае металлический сердечник медь – инвар - медь расположен с одной стороны ПП и отделяется от нее слоем изоляции. Во втором - композиционный материал использован для слоев питания и заземления, находящихся внутри слоистой структуры. Толщина каждого слоя 0,13 мм, общая толщина МПП этого варианта из шести проводящих слоев составляет 1,02 мм.

Достоинством материала медь – инвар - медь является возможность регулирования величины ТКЛР, изменяя соотношение толщины медного покрытия и толщины самого инварового сердечника. Чем больше толщина инвара, тем меньше ТКЛР композиционной фольги.

Инваровый слой обеспечивает механическую жесткость конструкции в 8-20 раз выше, чем у конструкции без металлических слоев, что очень важно при трех-, восьмикратном увеличении плотности размещения компонентов, вызывающей искривление ПП в процессе сборки.

Учитывая изложенное, а так же то, что конструктив МПП со стеклополиимидными и эпоксикевларовыми слоями не обеспечен сейчас серийно выпускаемыми отечественными материалами, первоочередное развитие получила технология изготовления МПП с инваровыми слоями, а в качестве диэлектрических материалов используются слои из эпоксидных стеклопластиков.

Наряду с инваром нашел применение и такой металл как молибден, плакированный медью, который обеспечивает высокий модуль жесткости ПП. Применяются слоистые пластики на эпоксидной основе с волокнами графита; полиимидный пластик армированный сеткой из кварцевого волокна и другие материалы.

На основе отечественных разработок [3,19,30] можно дать следующие рекомендации по использованию материалов ПП в серийном производстве: для одно- и двухсторонних ПП использовать стеклотекстолит марки СТНФ, СТФ, СФ, ФС, СТЭФ-1, СТФ-2, в зависимости от требований, предъявляемых технологическим процессом, к нагревостойкости плат. Для бытовой аппаратуры допускается применение материала СТФ ТУ16 - 503. 161 - 88.

Для установки безвыводных керамических корпусов, имеющих ТКЛР порядка $(5...7) \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ в отечественной практике используются многослойные ПП с несколькими внутренними, имеющими окна, металлическими слоями из инвара, покрытого медью. Эти ПП следует применять при изготовлении сложных устройств с микросхемами в безвыводных керамических корпусах, у которых относительно большие размеры и отсутствие ножек значительно осложняют проблему несогласованности по ТКЛР с материалом платы.

2.4. Защитная маска

Монтажные платы, как правило, покрывают защитным слоем. Этот слой выполняет в данной технологии следующие функции:

- защита печатной платы от повреждений и коррозии;
- ограничение поверхностей пайки знакоместа, при котором припой в процессе пайки остается на поверхностях пайки;
- предотвращение стекания припоя на печатные проводники;
- предотвращение короткого замыкания вследствие разбрызгивания припоя или под воздействием капель припоя;
- повышение сопротивления изоляции между печатными проводниками и поверхностями пайки знакоместа.

Защитная маска (ее называют еще стоп-маска) пайки наносится на поверхность платы различными способами:

- трафаретной печатью, используя защитный лак;
- трафаретной печатью, используя фоточувствительный лак;
- использованием фоточувствительной сухой пленки.

Обычная рабочая последовательность в классической технологии заключается в том, что общий рисунок проводников, то есть печатные проводники и припойные площадки облуживаются, а затем методом трафаретной печати на проводники наносится лак, причем все припойные площадки остаются свободными от лака, равно как и переходные отверстия. В случае использования того же метода в ТПМ возникает опасность того, что часть (также нанесенного методом трафаретной печати) припоя стечет с контактной поверхности для пайки. При этом возникает так называемый эффект "оранжевой кожи" характерный тем, что на поверхностях пайки в определенных случаях оказывается количество припоя, недостаточное для нормальной пайки с целью получения безупречного места пайки, что в свою очередь может повлечь за собой возникновение эффекта "надгробного камня", рассмотренного выше.

Во избежание этих недостатков изображение проводников более не облуживается, вместо этого защитная стоп - маска наносится непосредственно на чистую медь и открытые припойные площадки облуживаются лишь частично. Если в качестве стоп - маски используется сухая пленка, то в этом случае закрываются также и переходные отверстия. Мнения о том, должно ли осуществляться это покрытие на обеих сторонах платы, во многом расходятся из-за возможного включения воздуха.

Переходные отверстия должны закрываться на стороне конструктивного компонента, по меньшей мере, в том случае, если они располагаются под интегральной схемой (корпус SO). За счет этого предотвращается возникновение коротких замыканий, которые не могут быть распознаны визуально, а также возникновение загрязнений флюсом или чистящим средством. При использовании этого метода прямой стоп - маски исключается возможность стекания припоя с поверхности пайки и возникновения эффекта "оранжевой кожи" (рис. 32).

С целью повышения сцепления между не облуженными печатными проводниками и стоп - маской для пайки используется "техника чернения", которая заключается в том, что все участки, которые не должны использоваться в качестве припойных мест, оксидируются к черному цвету.

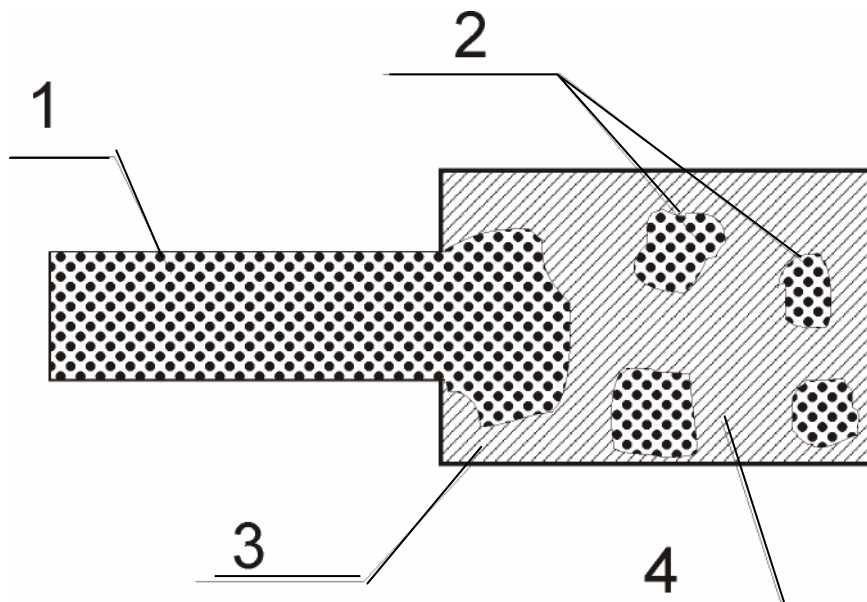


Рис. 32. Эффект "оранжевой кожи"
1-печатный проводник; 2-припой; 3-припойная площадка;
4-участок припойной площадки без припоя.

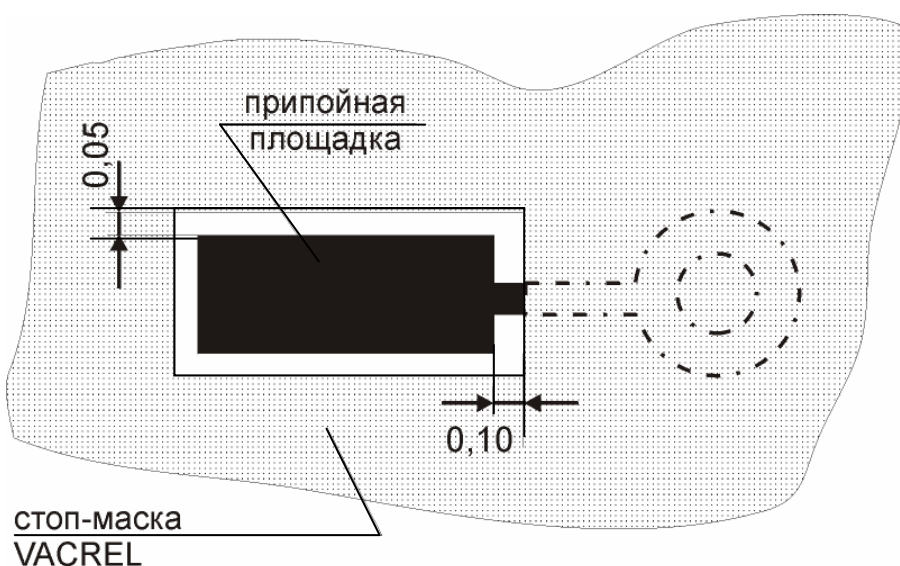


Рис. 33. Стоп-маска для пайки из материала VACREL

Стоп - маска должна подходить как можно ближе к поверхности пайки, но не располагаться на ней (рис. 33). Выемка в маске всегда должна быть несколько больше, чем поверхность пайки. Величина выемки при использовании лака при трафаретной печати составляет 0,2 мм, а при использовании сухой пленки, например, вакрел - 0,1 мм. При наложении на печатный проводник маска должна отстоять от печатного проводника как минимум на 0,1 мм.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие факторы необходимо учитывать при проектировании конструкции печатной платы в ТПМ?
2. Поясните термин «техника тончайших проводников».
3. Что такое конструкция печатного рисунка печатной платы?
4. Какие факторы влияют на геометрию печатных проводников?
5. Каковы традиционные и прогрессивные технологии изготовления печатных плат?
6. Поясните недостатки субтрактивной технологии.
7. Достоинства аддитивной технологии изготовления ПП.
8. Приведите последовательность технологических операций при аддитивном способе изготовления печатных плат.
9. Приведите широко используемые материалы для изготовления ПП.
10. Недостатки известных материалов для изготовления ПП.
11. Какие требования предъявляются к ПП при монтаже керамических компонентов?
12. Перечислите направления в технологии для обеспечения согласования температурных коэффициентов линейного расширения материалов ПП и керамических компонентов.
13. Методы изготовления ПП с металлической основой.
14. Недостатки плат с металлическим основанием.
15. Какие материалы используются для изготовления металлического основания ПП?
16. Что такое инвар?
17. Варианты конструкции печатных плат на основе инвара.
18. Достоинства металлического основания на основе инвара.
19. Каковы рекомендации при выборе материалов ПП для отечественного серийного производства?
20. Назначение защитной маски печатной платы в ТПМ.
21. Способы нанесения на ПП защитной маски.
22. Поясните эффект «оранжевой кожи».
23. Что такое техника чернения?
24. Почему выемка в защитной маске должна всегда быть больше, чем поверхность припойной площадки?
25. Стоп-маска может закрывать переходные отверстия на печатной плате?

3. ТЕХНОЛОГИЯ МОНТАЖА

3.1. Варианты поверхностного монтажа

Существуют три основных варианта реализации поверхностного монтажа:

1. Чисто поверхностный монтаж на плате (односторонний или двухсторонний).
2. Смешанно - разнесенный вариант, когда традиционные (DIP) компоненты размещаются на лицевой стороне, а простые чип - компоненты - на обратной.
3. Смешанный монтаж, когда традиционные компоненты для поверхностного монтажа находятся на лицевой или обеих сторонах платы.

Особенности этих процессов заключаются в следующем:

- корпуса компонентов для поверхностного монтажа не закрепляются на поверхности ПП с помощью выводов;
- корпуса компонентов для ТПМ приклеиваются с помощью клеев или припойной пасты;
- пайка двойной волной припоя применима только к простым чип - компонентам, устанавливаемым на обратной стороне ПП, и к термостойким компонентам;
- компоненты для ТПМ на лицевой стороне припаиваются с применением пайки расплавлением дозированного припоя в парогазовой фазе или в ИК - печи, или с помощью лазерного нагрева;
- при смешанном монтаже необходимо перевертывание платы с компонентами и, как минимум, две установки пайки.

Выбор варианта реализации монтажа при проектировании изделия с применением ТПМ осуществляется не только с точки зрения технологических особенностей его изготовления, а скорее в зависимости от сочетания традиционных и монтируемых на поверхность компонентов. Иногда само отсутствие, каких – либо компонентов для ТПМ вынуждает к использованию традиционных (DIP) компонентов.

Действительно, некоторые компоненты не поддаются миниатюризации до размеров рассмотренных выше поверхностных компонентов. Например, нет электролитических конденсаторов с большой номинальной емкостью, размеры которых пригодны для поверхностного монтажа. Тоже можно сказать о трансформаторах, реле, индуктивностях.

Имеются также компоненты, которые выпускаются в недостаточном объеме или несовместимы с некоторыми технологическими процессами изготовления изделия. Это в большей степени присуще конденсаторам, например, керамическим и электролитическим [26], которые могут повреждаться при длительном погружении в расплавленный припой, что приводит к появлению дефектов в паяных соединениях. Компоненты в сложных корпусах, у которых четырехстороннее расположение выводов, также имеют ограничение на пайку волной припоя из-за слишком большой вероятности образования перемычек припоя.

Таким образом, период времени использования промежуточного смешанного монтажа компонентов в ТПМ, по всей вероятности, будет существовать, сдерживая микроминиатюризацию аппаратуры [16].

3.1.1. Чисто поверхностный монтаж

На ПП наносят пасту методом трафаретной печати или дозированием. Количество припоя должно обеспечивать требуемые электрофизические характеристики паяного соединения. После позиционирования и фиксации компонентов следует операция пайки оплавлением дозированного припоя с применением методов из п.3.2. В случае двухстороннего поверхностного монтажа на обратной стороне фиксируются простые чип - компоненты с помощью адгезива и подвергаются пайке двойной волной припоя, либо оплавлением дозированного припоя вместе с компонентами на лицевой стороне. Далее следует очистка и испытание смонтированных плат.

Достоинства этого варианта монтажа следующие:

- наибольшая степень микроминиатюризации всего изделия;
- высокая автоматизация технологического процесса;
- высокая воспроизводимость, малый разброс электрофизических характеристик компонентов за счет группового способа монтажа;
- одноступенчатый процесс пайки;
- высокая надежность изделия;
- процесс с потенциально высоким выходом годных изделий;
- низкие затраты;
- улучшенные выходные электрические параметры изделия;
- уменьшение размеров изделия на 40-75 %.

На рис.34 приведен вариант чисто поверхностного монтажа компонентов.

Недостатки этого варианта монтажа следующие:

- недостаточная номенклатура и объем выпуска компонентов для ТПМ;
- большие первоначальные затраты на приобретение сборочно-монтажного оборудования;
- затраты с переквалификацией и обучением кадров;
- затруднены испытания и ремонт изделия.

3.1.2. Смешанно-разнесенный монтаж

Существуют две разновидности реализации этого варианта монтажа [26]. В первом варианте сборку начинают с чип - компонентов на обратной стороне платы, которые приклеиваются. Затем формуют и обрезают выводы у традиционных (DIP) и вставляют в отверстия с лицевой стороны платы, паяют двойной волной припоя одновременно с чип - корпусами. Во - втором варианте сборку начинают с установки на лицевой стороне традиционных компонентов, затем обрезают выводы у всех компонентов одновременно, а затем монтируют чип - компоненты на обратной стороне и запаивают все компоненты двойной волной припоя.

Первый вариант обеспечивает повышенную плотность монтажа и минимальное количество переверотов платы в процессе сборки.

Достоинства этого варианта монтажа следующие:

- выигрыш в плотности монтажа по сравнению с традиционной технологией монтажа компонентов в отверстия;
- одноступенчатый процесс пайки (пайка двойной волной припоя);
- можно использовать имеющееся оборудование из традиционной технологии;
- объем изделия уменьшается на 10-30 %.

На рис.35 приведен вариант смешанно - разнесенного монтажа компонентов.

Недостатки этого варианта монтажа следующие:

- требуется специальный флюс или адгезив для закрепления компонентов на обратной стороне платы;
- требуется дополнительное сборочно-монтажное оборудование;
- затруднены испытания и ремонт изделия;
- обратная сторона платы используется не полностью из-за выводов DIP-компонентов.

3.1.3. Смешанный монтаж

Данный вариант монтажа реализуется в трех разновидностях. Первая заключается в установке компонентов для поверхностного монтажа на лицевой стороне платы; пайка расплавлением дозированного припоя. Традиционные компоненты также с лицевой стороны; обрезка выводов у всех компонентов. Пайка волной припоя. Простые чип-компоненты с фиксацией на обратной стороне платы. Пайка двойной волной припоя одновременно с традиционными компонентами.

Вторая разновидность заключается в установке чип - компонентов для поверхностного монтажа на обеих сторонах платы. Пайка расплавлением дозированного припоя. Традиционные компоненты на лицевой или обеих сторонах с ручным монтажом и пайкой выводов.

Третья разновидность заключается в установке компонентов для поверхностного монтажа на лицевой или обеих сторонах платы. Пайка расплавлением дозированного припоя. Формовка, обрезка выводов и монтаж в отверстия традиционных компонентов на лицевой стороне платы. Пайка двойной волной припоя одновременно с уже паянными простыми чип - компонентами на обратной стороне платы.

Это, вероятно, самая сложная разновидность монтажа в ТПМ. Следует отметить, что в таком технологическом процессе возрастает количество контрольных операций из-за сложности сборки при наличии компонентов на обеих сторонах ПП. Неизбежно возрастает количество паяных соединений, причем двух типов - в отверстия и на поверхность, и сложности в достижении их высокого качества.

Достоинства этого варианта монтажа следующие:

- большой выбор компонентов с целью достижения заданного критерия качества всего изделия;
- высокая плотность монтажа;
- оптимальная стоимость компонентов;
- можно полностью автоматизировать монтаж компонентов;

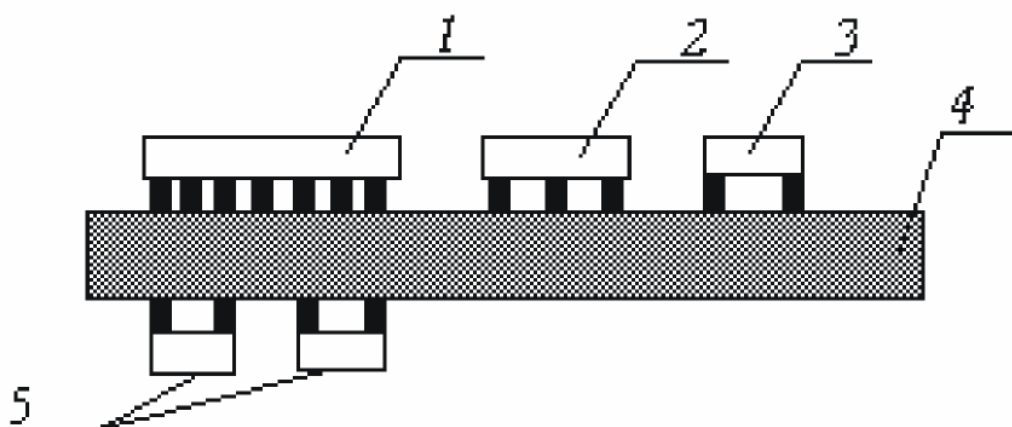


Рис. 34. Чисто поверхностный монтаж компонентов:
 1-сложный компонент для монтажа на поверхность (корпус SO);
 2 - сложный компонент типа SOT;
 3-ЧИП конденсатор; 4-основание печатной платы;
 5 - ЧИП резистор.

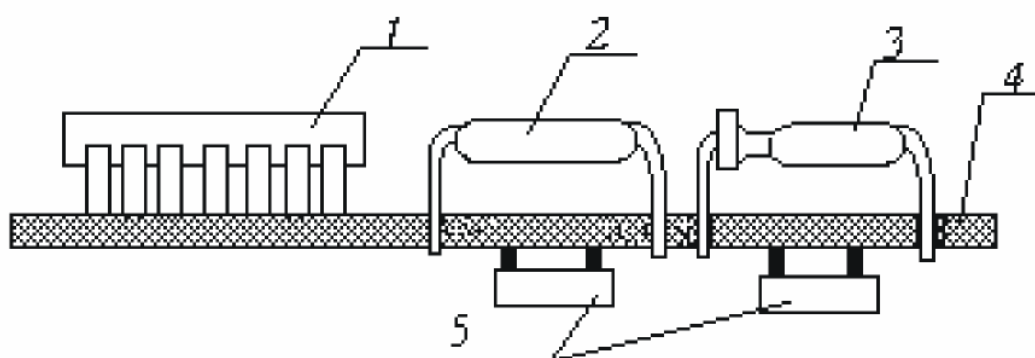
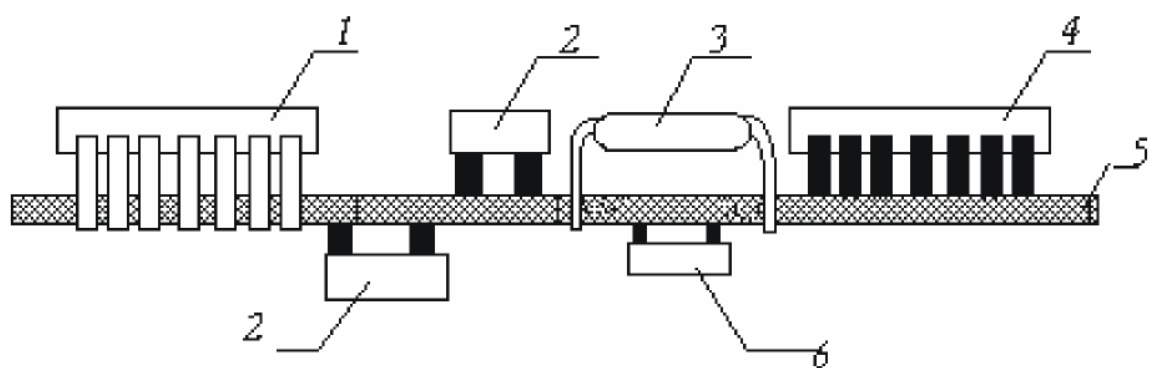


Рис. 35. Смешанно-разнесённый вариант монтажа:
 1 - корпус типа DIP;
 2-резистор с радиальными выводами;
 3-конденсатор с радиальными выводами;
 4 - основание печатной платы;
 5-простые ЧИП компоненты (резистор, конденсатор)



Р и с . 3 6 . С м е ш а н н ы й м о н т а ж к о м п о н е н т о в :
 1-корпуса типа DIP; 2-корпуса типа SOT; 3-элементы с радиальными выводами;
 4-корпус типа SO; 5-основание печатной платы; 6-ЧИП компоненты.

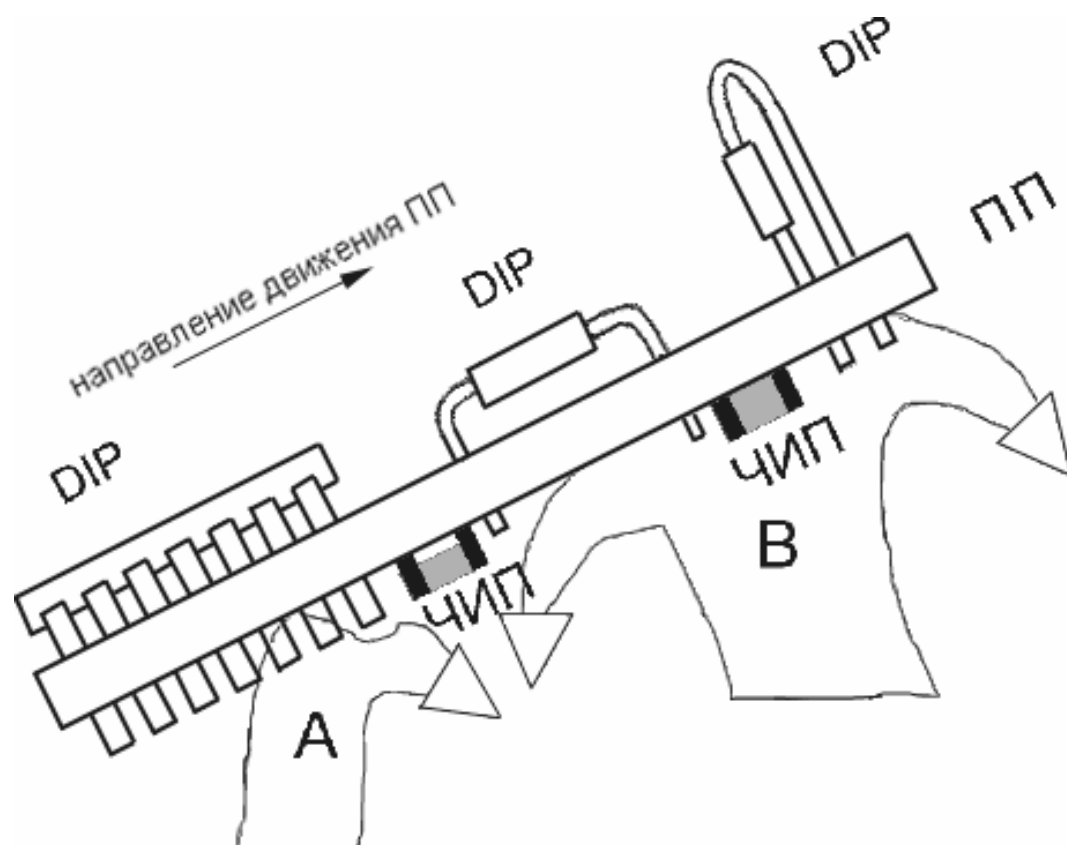


Рис. 37. Процесс пайки двойной волной припоя.
 А-первичная волна; В-вторичная волна.

- можно использовать имеющееся технологическое оборудование из традиционного технологического процесса монтажа компонентов в отверстия;
- уменьшение объема изделия на 20-60 %.

На рис.36 приведен вариант смешанного монтажа компонентов.

Недостатки этого варианта монтажа следующие:

- многоступенчатый технологический процесс;
- требуется дополнительное сборочно-монтажное оборудование;
- во второй разновидности требуются затраты ручного труда;
- требуется специальный флюс для закрепления компонентов на обратной стороне платы;
- затруднены испытания и исправление брака;
- обратная сторона или обе стороны используются не полностью из-за выводов DIP-компонентов.

3.2. Методы пайки

Пайка означает соединение металлических поверхностей. Соединительным средством является припой, температура плавления которого ниже точки плавления, подлежащих соединению деталей.

При групповой пайке компонентов на ПП должно осуществляться одновременное получение всех, расположенных в одной плоскости, паяных соединений, причем для всех соединений должно быть обеспечено достаточное качество. С этой целью рассмотрим ряд методов и рекомендаций для получения качественного паяного соединения.

В технологии поверхностного монтажа компонентов для пайки компонентов на печатной плате применяются следующие методы пайки:

- пайка двойной волной припоя;
- пайка расплавлением дозированного припоя в парогазовой фазе;
- инфракрасная пайка;
- другие методы пайки.

3.2.1. Пайка двойной волной припоя

Этот метод пайки применим для пайки простых чип - компонентов, расположенных на одной стороне ПП, как правило, обратной. Первая волна делается турбулентной и узкой, которая исходит из сопла под большим давлением. Турбулентность и высокое давление потока припоя исключает формирование полостей с газообразными продуктами разложения флюса. Однако турбулентная волна все же образует перемычки припоя, которые разрушаются второй волной, более пологой ламинарной волной с малой скоростью истечения. Вторая волна обладает очищающей способностью и устраняет перемычки припоя, а также завершает формирование галтелей с целью создания качественного профиля места пайки. Для устранения перемычек также используется специальное приспособление - воздушный нож,

который направляет струю горячего воздуха в место пайки с целью удаления перемычек и излишка припоя.

Пайка двойной волной припоя применяется, в настоящее время, для смешанного монтажа, когда традиционные, DIP-компоненты, расположены на лицевой стороне, а простые чип - компоненты - на обратной (рис.37).

При высокой плотности монтажа, которую позволяет реализовать ТПМ, с помощью данной пайки практически невозможно пропаять поверхностно монтируемые компоненты из-за эффекта затенения выводов компонента корпусом другого компонента. Чтобы уменьшить эффект затенения, прямоугольные чип - компоненты следует размещать перпендикулярно направлению движения волны. Трудно паять двойной волной припоя транзистор в корпусе SOT-89 (отечественный КТ-47), поскольку он имеет довольно массивный центральный вывод, что затрудняет его равномерное смачивание припоем по всей поверхности.

3.2.2. Пайка в парогазовой фазе

Пайка расплавлением дозированного припоя в парогазовой фазе отличается от известных ранее методов. Процесс пайки начинается с нанесения, как правило, трафаретным способом припойной пасты на припойные площадки знакоместа, затем на поверхность ПП устанавливаются компоненты. Далее паста нагревается до температуры плавления припойной пасты, в результате чего образуется паяное соединение между припойной площадкой знакоместа ПП и контактной площадкой компонента.

Нагрев ПП в установке пайки в парогазовой фазе осуществляется за счет паров специальной жидкости, которая конденсируется на поверхности платы, отдавая скрытую теплоту парообразования открытым участкам поверхности печатной платы. При этом припойная паста расплавляется и образует галтель. Когда температура пасты достигнет температуры жидкости, процесс конденсации прекращается и прекращается нагрев пасты. Повышение температуры платы от ее начальной температуры (например, 25 °С) до температуры плавления припоя, осуществляется очень быстро и не поддается регулированию (рис.43). Поэтому необходим предварительный нагрев платы с компонентами для уменьшения термоудара. Температура расплавления припойной пасты также не регулируется и равна температуре кипения, используемой при пайке, жидкости. Такой жидкостью является инертный фторуглерод.

С целью предотвращения утечки дорогого фторуглерода из установки поверх основной технологической среды создается дополнительная среда из более дешевого фреона. Основной недостаток этих установок состоит в том, что на границе двух технологических сред происходит образование кислот, которые разрушают плату и установку.

Установки для пайки с двумя рабочими жидкостями оказались непригодными, поэтому стали выпускать установки с относительно небольшими входными и выходными отверстиями, позволяющие реализовать систему с одной технологической средой (рис.38).

3.2.3.Пайка в инфракрасной печи

Пайка расплавлением дозированного припоя в инфракрасной (ИК) печи аналогична пайке в парогазовой фазе, за исключением того, что нагрев платы с компонентами производится не парами жидкости, а ИК - излучением. Передача тепла излучением имеет большое преимущество перед теплопередачей за счет теплопроводности и конвекции в рассмотренных ранее методах, так как это единственный из механизмов теплопередачи по всему объему изделия. Остальные механизмы передают тепловую энергию только поверхности изделия.

ИК - пайка производится в специальных установках, имеющих от двух до пяти зон нагрева с автономно регулируемыми нагревателями для создания необходимого температурного профиля нагрева. Например, в трехзонной установке ИК-пайки, в первой зоне плата подогревается ИК керамическими нагревателями, во второй - происходит выравнивание нагрева таким же нагревателем, в третьей зоне происходит оплавление пасты ИК кварцевыми ламповыми излучателями. Затем плата охлаждается.

При пайке в ИК-печи скорость нагрева регулируется изменением мощности излучателя и скорости движения транспортера с платой, поэтому термоудар платы и компонентов может быть исключен посредством постепенного нагрева.

Специалисты утверждают, что с помощью этого метода достигаются наилучшие результаты пайки. Это обусловлено тем, что температурный профиль (температурная кривая, рис.39) согласован во всех случаях с заданными предпосылками. Часто использующийся контраргумент в отношении высокой термической нагрузки на конструктивные компоненты является, как показывает опыт, несостоятельным. Температура должна подводиться к конструктивному компоненту не слишком быстро, однако сам процесс пайки должен протекать как можно быстрее. Температурная кривая для метода пайки в ИК-печи представлена на рис.39 и является типичной для плат малого размера. На участке от 0 до 90 с температура увеличивается приблизительно до 85 °С. В течение этого времени происходит испарение летучих материалов, которые содержатся в паяльной пасте. На участке от 90 до 120 с при температуре от 90 °С до 130 °С происходит удаление вязкостных добавок. На участке от 120 до 200 с и при температуре от 130 °С до 180 °С осуществляется активация частиц флюса, и протекают необходимые восстановительные процессы. На последнем участке от 200 до 255 с достигается температура пайки 217 °С.

На основании этих характеристик можно сделать вывод о том, что процесс пайки в ИК-печи сопряжен с определенным временно-температурным профилем, который необходим для достижения высококачественных результатов. Для более крупных печатных плат необходимо время предварительного нагрева до 3 мин.

Современные ИК-печи позволяют осуществлять пайку ПП с большим количеством конструктивных различных компонентов с высоким качеством в течение 10 с. В течение этой непродолжительной длительности такта температура внутри интегральной схемы остается существенно меньшей, нежели температура плавления припоя.

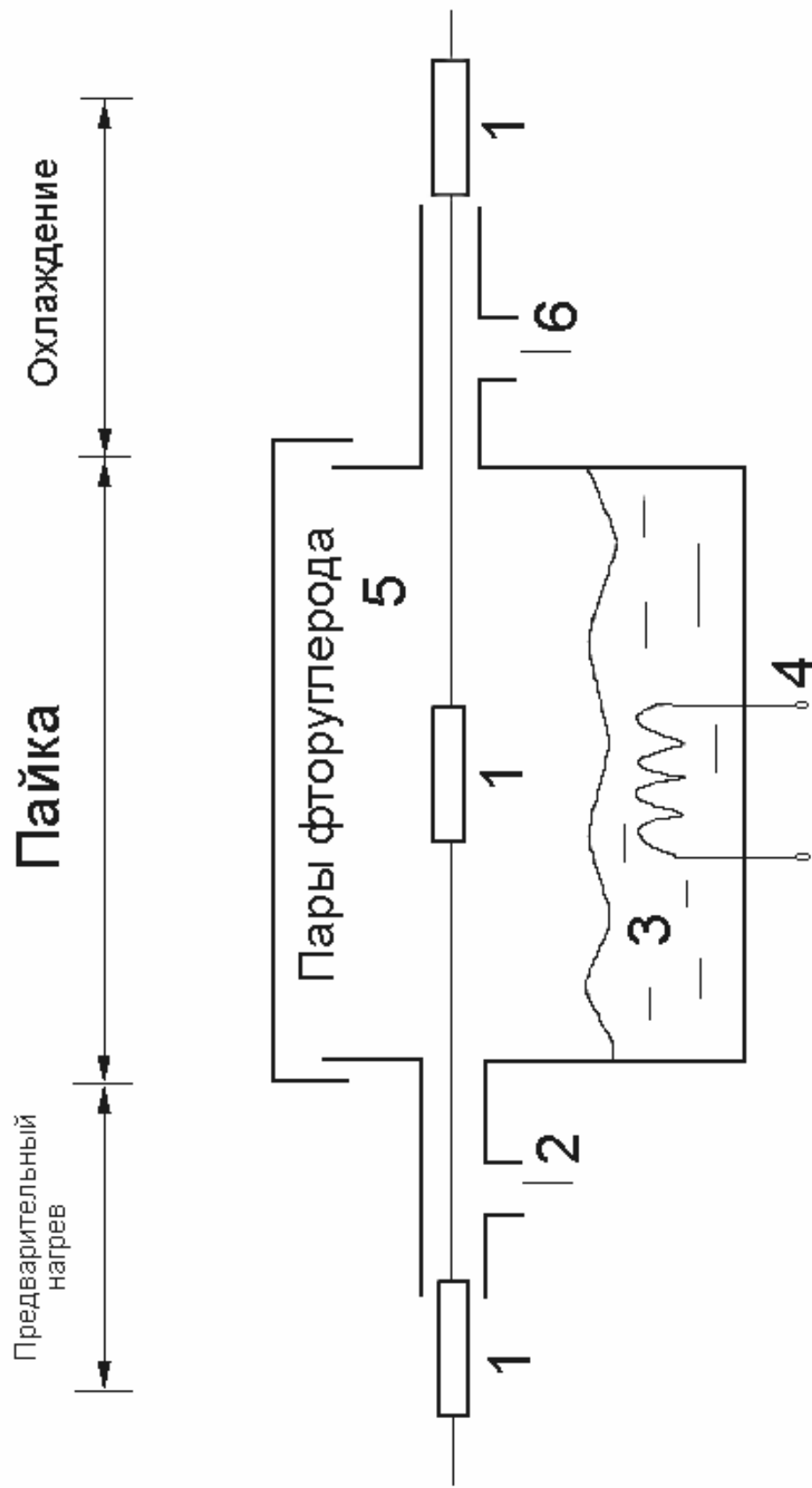


Рис. 38. Установка пайки в парогазовой фазе с использованием одной технологической среды
1- печатная плата; 2, 6- вентиляционные отверстия; 3-кипящий фторуглерод; 4-нагреватель;
5-камера установки.

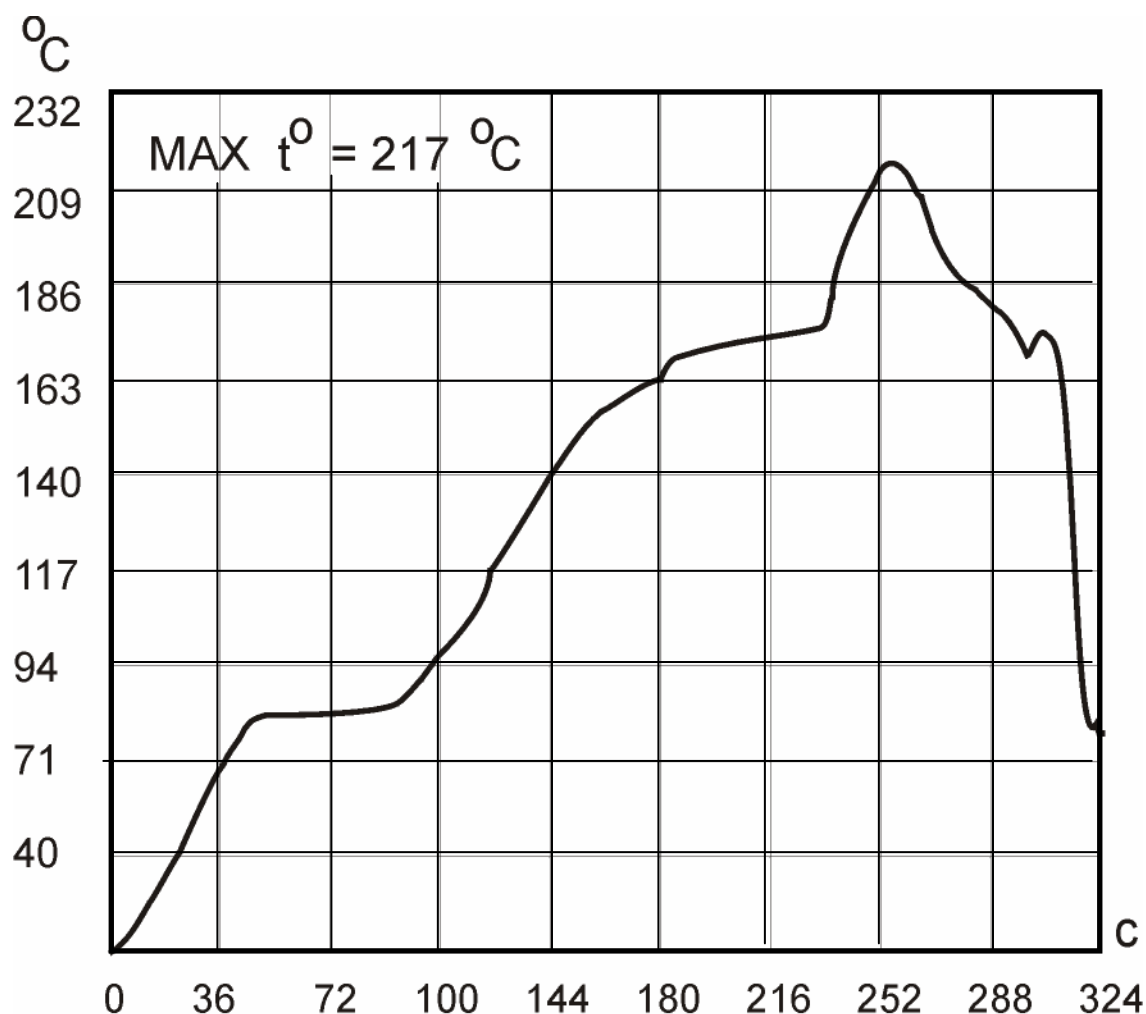


Рис. 39. Температурная кривая работы ИК печи.

Достоинства метода пайки в ИК-печи:

- испытанный способ серийного и массового изготовления, который может быть автоматизирован;
- отсутствует необходимость фиксации, приклеивания конструктивных компонентов, по меньшей мере, в случае одностороннего монтажа. К тому же в этом случае обеспечивается полное действие эффекта самостоятельного центрирования ("плавание" конструктивного элемента на жидком припое);

- высокая плотность монтажа. Отсутствует необходимость предусмотра специальных (более значительных) технологических зон между конструктивными компонентами, так как при этом методе пайки нет необходимости в выравнивании конструктивных компонентов относительно обусловленной системой оси;

- все конструктивные компоненты могут паяться. Это особенно важно для конструктивных компонентов с так называемыми скрытыми под корпус контактными площадками, например, PLCC [19] на керамическом кристалле. Пайка таких компонентов может осуществляться только в ИК-печи с достижением необходимой надежности, так как контроль мест пайки сопряжен со значительными трудностями и по этой причине основное внимание должно быть уделено вопросу надежности;

- подвод тепла может осуществляться целевым образом, то есть осуществляется подвод такого количества тепла, которое необходимо для обеспечения высококачественной пайки и может регулироваться до оптимальной величины применительно к отдельным регулируемым зонам;

- незначительные расходы на установку и последующие издержки.

Недостатки этого метода определены следующими факторами:

- неравномерность нагрева изделий, появление в них горячих точек;

- избирательность по отношению к материалу ПП и ограничения по выбору элементной базы. То и другое объясняется поглощающей способностью элементов конструкции, подвергающихся ИК - нагреву по всему объему (эффект абсолютно черного тела);

- трудность отвода легко испаряющихся веществ (флюса, составляющих припойных паст);

- необходимость подбора режима пайки для каждого типа печатного узла.

В настоящее время недостатки ИК-пайки значительно уменьшены. Ранние конструкции ИК - печей использовали для нагрева ламповые ИК - излучатели с температурой 700 - 800 °С. Поскольку режим пайки требует температуру 210 - 215 °С, то нагрев значительно отличается от равновесного, при этом возникали перегретые участки, обусловленные, в частности, различной степенью черноты поверхностей. Фирма Dynapert предлагает формулу зависимости длины волны излучателя от его температуры, которая имеет следующий вид

$$\lambda = 2898 \text{ мкм град} / T^0 \text{ К},$$

где λ - длина волны в мкм, T^0 - температура излучателя в К⁰. Стандартное оборудование ИК-печи работает в диапазоне температур 190-450 °С, из которого следует, что длина волны лежит в пределах 4-6,25 мкм, поэтому улучшение характеристик установок пайки получено переходом на излучатели, работающие в средневолновом ИК - диапазоне (4 - 6,25 мкм). Конструктивно такие излучатели представляют собой керамические панели больших размеров со значительным количеством воздушных камер, работающих при температуре 280 -325 °С. В таких устройствах до 60 % тепловой энергии доставляется к объему паяного изделия за счет конвекции, а 40 % - при помощи средневолнового ИК - излучателя. Такие комбинированные установки производят нагрев объекта в режиме, близком к равновесному, и в настоящее время широко используются в ТПМ.

Применительно к конструкции современных установок, которые ещё долго будут использоваться в обозримом будущем, следует учитывать следующее:

- длина волны излучателя должна изменяться в диапазоне поглощения обрабатываемого материала;

- мощность излучения или эффективность в спектре должна достигать своей максимальной величины при использовании необходимой длины волны.

На рис.40 приведена зависимость в нормальной атмосфере поглощения /пропускания ИК - излучения от длины волны.

На рис.41 поясняется зависимость поглощения/пропускания ИК - излучения базовым материалом от длины волны.

Таким образом, наиболее эффективной длиной волны излучателей является длина в диапазоне 4 - 6,25 мкм, т.е. в так называемом средневолновом диапазоне инфракрасного спектра. Этот диапазон лежит вне диапазона для видимого света, т.е. различная окраска объектов не оказывает никакого влияния на их равномерный нагрев. Другой важной особенностью средневолнового излучателя является способность к лучшему нагреву воздуха по сравнению с обычными инфракрасными лампами.

Нагрев подвижного воздуха может использоваться, например, для предотвращения возникновения тени, которая оказывается тем сильнее, чем больше размеры конструктивных компонентов. К числу таких конструктивных компонентов можно отнести пластмассовые носители чипов с 44, 68, 84, 200 выводами. Кроме того, плохая теплопроводность эпоксидных материалов ухудшает результаты пайки.

На рис.42 приведен вид сбоку на установку ИК - пайки с использованием плоских источников излучения (для простоты первая и вторая зоны не показаны).

Первая зона установки предназначена для предварительного нагрева платы, которая активизирует флюс, а, следовательно, уменьшает количество возможно окислившихся мест соединений, а также удаляет летучие вещества из паяльной пасты, что является важной предпосылкой для достижения хорошего результата пайки. Вторая зона представляет собой вентилирующую переходную зону, в которой осуществляется отвод летучих материалов. К этой зоне примыкает зона протекания процесса, в которой три плоских излучателя расположены выше транспортировочной ленты и три плоских излучателя - ниже транспортировочной ленты.

Каждый из этих излучателей индивидуально управляется с помощью регуляторов на базе микропроцессора. Устройство управления, которое входит в состав установки, обеспечивает поддержание заданного значения и постоянной компенсации при падении и возрастании температуры. Аналогичным образом устройство управления компенсирует нелинейные характеристики применяемого термоэлемента. Этот термоэлемент с незначительной массой и малым временем реагирования располагается в центре плоского излучателя. Такая система поддержания температуры обеспечивает наилучшую реакцию нагревательного устройства при различных нагрузках печи и позволяет обрабатывать самые разнообразные ПП.

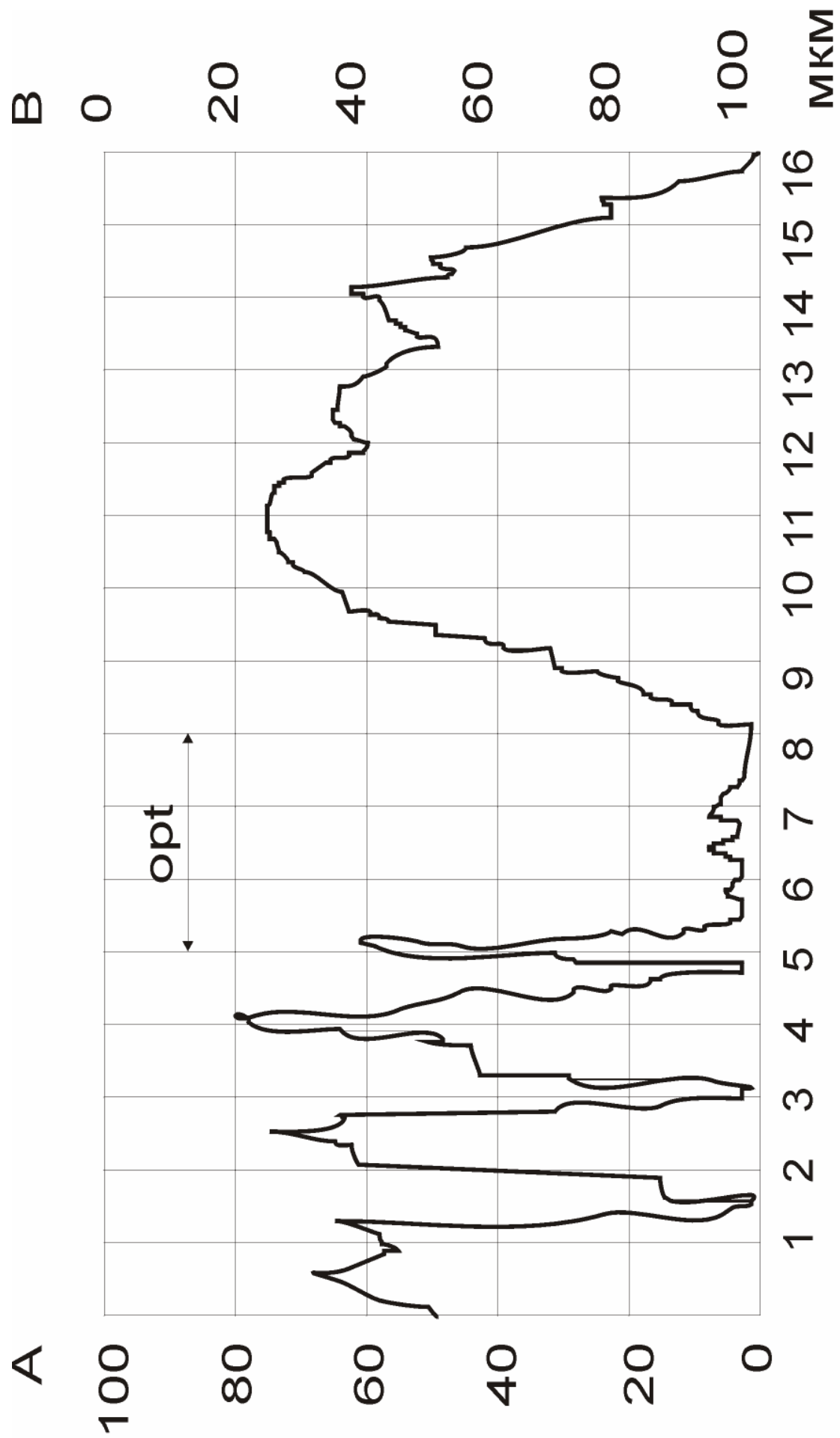


Рис. 40. Кривая поглощения/пропускания ИК излучения от длины волны.
 А-поглощение (%); В-пропускание (%).

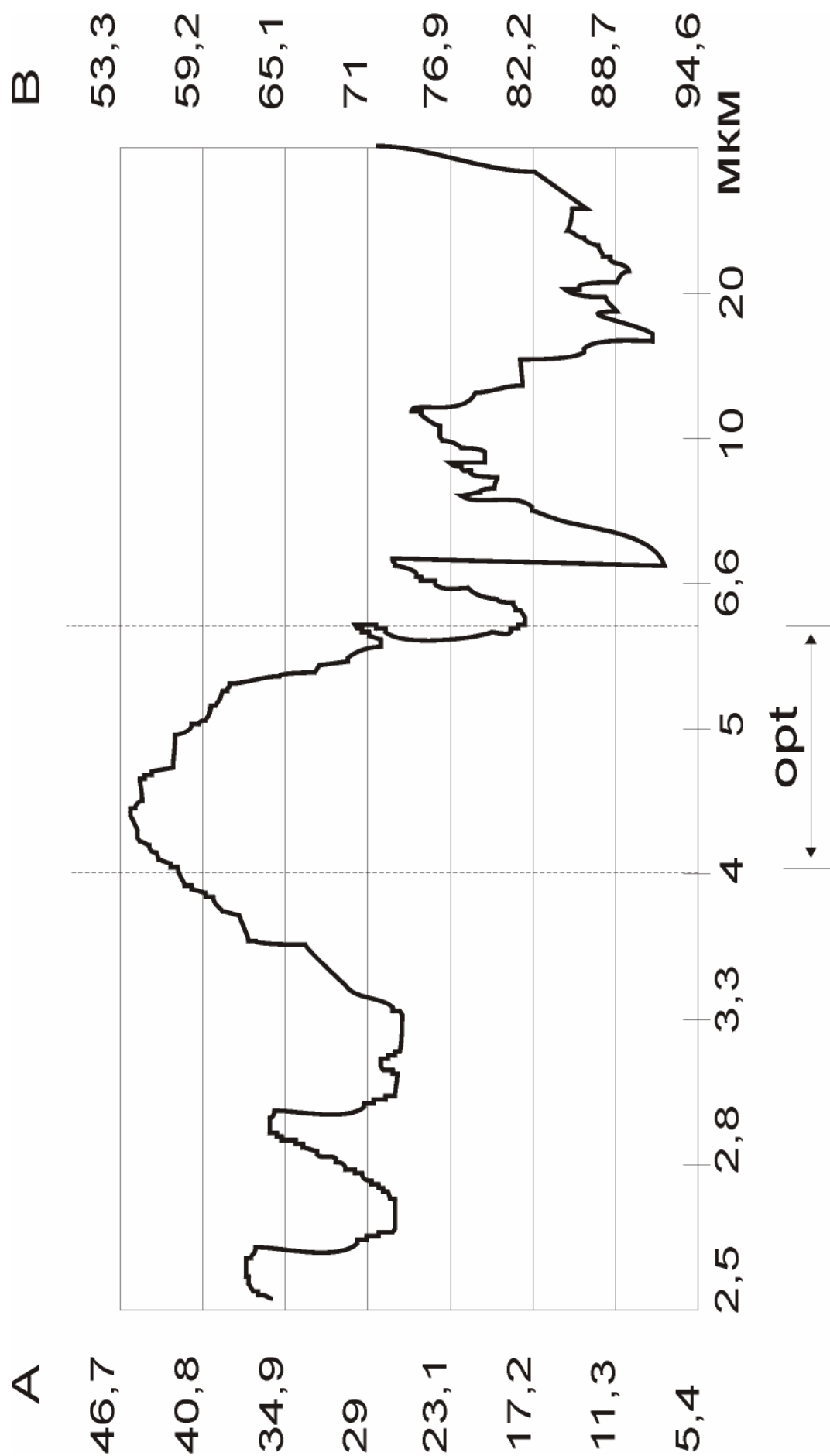


Рис. 41. Зависимость поглощения/пропускания ИК излучения базовым материалом от длины волны
 А-пропускание (%); В-поглощение(%).

Ширина транспортировочной ленты из благородной стали, составляет 457 мм, а максимальное отклонение температуры внутри зоны протекания процесса - до $\pm 2,5$ °С. Скорость движения транспортировочной ленты контролируется замкнутой цепью регулирования и может изменяться в любой момент времени [49].

В зоне протекания процесса может создаваться инертная атмосфера (рис.42) за счет введения соответствующих газов, например, азота.

Производственные испытания установки такой конструкции показали, что в ней достигается согласование материала в отношении поглощения и достаточная передача конвективного тепла. При использовании плоских излучателей были достигнуты хорошие результаты пайки без обугливания и расслоения ПП.

Кроме этого, сравнение температуры на поверхности ПП с внутренней температурой конструктивного компонента доказали, что чувствительные к воздействию температуры компоненты при этом не повреждаются. С помощью цепного транспортера возможна также пайка ПП с двухсторонним монтажом.

3.2.4. Другие методы пайки

К другим методам пайки относится пайка расплавлением дозированного припоя с помощью нагретого приспособления, разработанного в Японии [12,26]. В этом методе печатная плата с компонентами помещается в теплопроводящий транспортер, содержащий набор специальных пластин, передающих тепло через плату к выводам компонентов.

Следующим, из этой группы методов, является пайка расплавлением дозированного припоя с помощью лазерного излучения, которое отличается от всех описанных методов тем, что места пайки нагреваются последовательно, а не одновременно. Главное достоинство лазерной пайки в том, что пучок лазерной энергии хорошо фокусируется, поэтому этот метод применяется для пайки выводов термочувствительных компонентов и компонентов с малым шагом выводов.

Лазерную пайку, главным образом, применяют для пайки выводов интегральных микросхем с шагом выводов менее 1 мм и для компонентов, которые не допускают перегрева в рассмотренных методах. При скорости пайки до 10 соединений в секунду лазерная пайка по производительности конкурирует с ИК и парогазовой пайкой, причем возможна пайка плат с большой плотностью компоновки и размерами припойных площадок до 25 мкм. Современное оборудование для лазерной пайки позволяет вести пайку одновременно двумя лучами для предотвращения вздыбливания компонента (эффект "надгробного камня"). Причем существуют конструкции лазерных установок, которые позволяют фокусировать луч в виде узкой полоски, способной паять одновременно все выводы микросхемы, расположенные по одну сторону корпуса. Применение двух узких полос с противоположных сторон корпуса микросхемы резко повышает производительность процесса пайки и приближает лазерную пайку к групповым методам пайки.

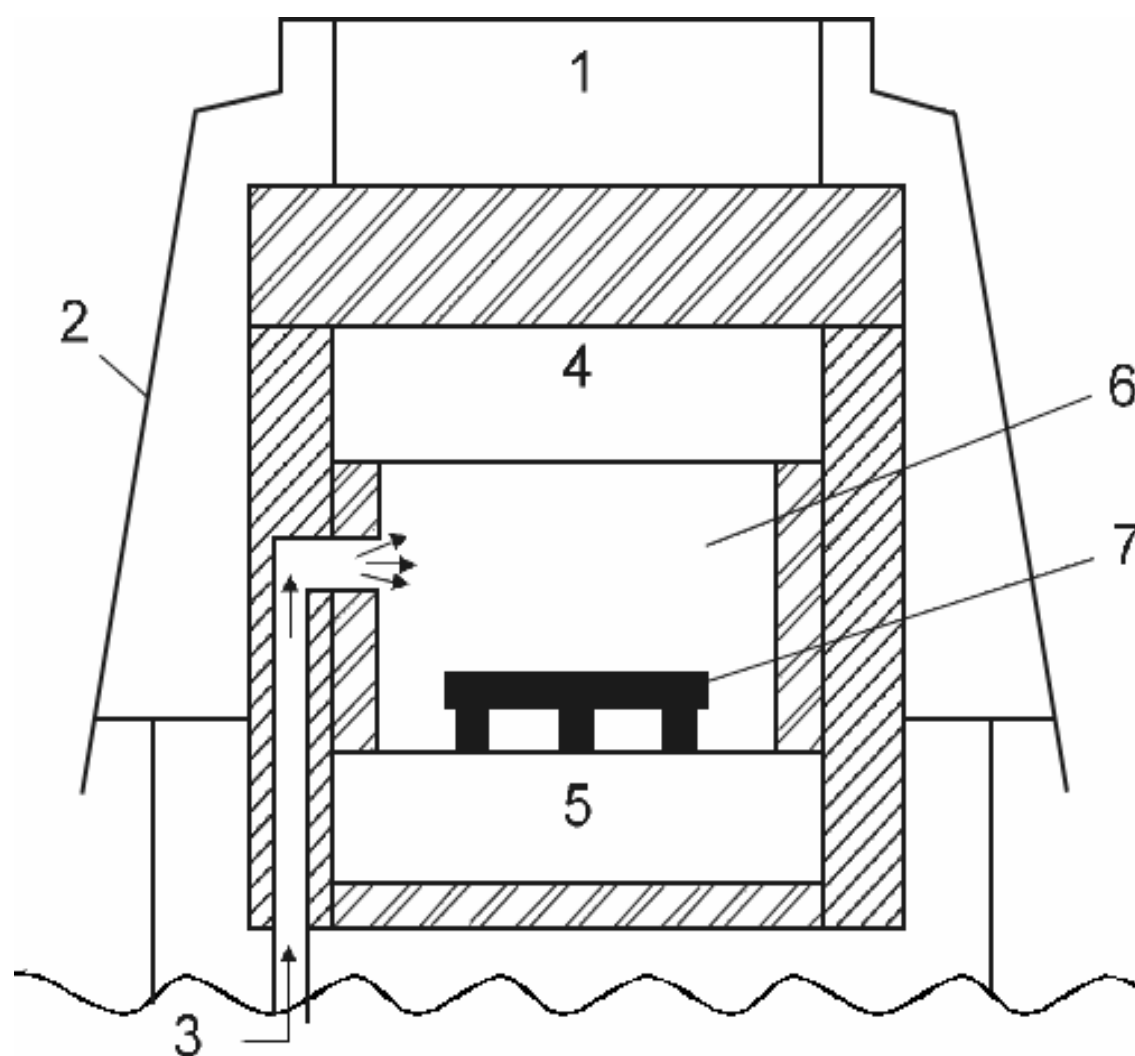


Рис.42. Установка ИК пайки с плоскими источниками излучения.
 1 - внутренний блок ; 2 - внешний блок ; 3 - впускное отверстие для
 внутренней атмосферы ; 4,5 - плоский излучатель ; 6 - область
 протекания процесса ; 7 - транспортировочная лента из благородной
 стали.

3.3. Сравнение методов пайки в парогазовой фазе и ИК-печи

При пайке в парогазовой фазе теплопередача осуществляется весьма быстро, после чего достигается термическое равновесие, то есть насыщенный пар, печатная плата и конструктивные компоненты нагреваются до температуры, которая задана точкой кипения жидкости.

Процесс охлаждения протекает в противоположность нагреву относительно медленно с целью высушивания конденсата, находящегося на плате внутри установки, и уменьшения потерь весьма дорогостоящей жидкости.

Нагрев платы в ИК-печи, осуществляющейся с помощью инфракрасного излучателя, происходит медленнее (рис.43, кривая 2), скорость нагрева почти на один порядок ниже по сравнению с установками для конденсационной пайки (рис.43, кривая 1). В зоне пайки не возникает состояние термического равновесия, а нагревание переходит непосредственно в фазу охлаждения. При сравнимом времени пайки пиковая температура превышает температуру при конденсационной пайке, однако при этом не возникает увеличение интегральной термической нагрузки.

Оба метода обладают специфическими преимуществами и недостатками, которые сведены в табл.21.

3.4. Сравнение методов пайки волной припоя и в ИК-печи

Для этой проверки была проведена пайка образцов при скорости движения ленты 0,8 м/мин применительно к двойной волне и в ИК-печи. На рис.44 приведены результаты испытаний, проведенные автором, с использованием срезающего усилия для обоих методов пайки, причем для образцов, пайка осуществлялась в ИК-печи, была выбрана толщина слоя паяльной пасты 250 мкм.

При этом прошедшие волновую пайку образцы отличаются существенно более высокой устойчивостью к срезающим усилиям по сравнению с образцами, прошедшими пайку в ИК-печи, эта величина в среднем для всех конструктивных форм больше приблизительно на 60 %.

Прочность таких мест пайки была подчас настолько высокой, что компоненты ломались, когда, прикладывающий срезающее усилие, крюк скользил по компоненту.

Полученные характеристики могут быть объяснены в основном следующими причинами:

- точка приклеивания существенно способствует устойчивости к воздействию срезающего усилия;
- при пайке волной наносится количество припоя больше, чем в случае наносимого под давлением дозированного слоя паяльной пасты толщиной 250 мкм;
- возникает иная структура пайки с более высокой прочностью;
- структура паяного слоя более однородная.

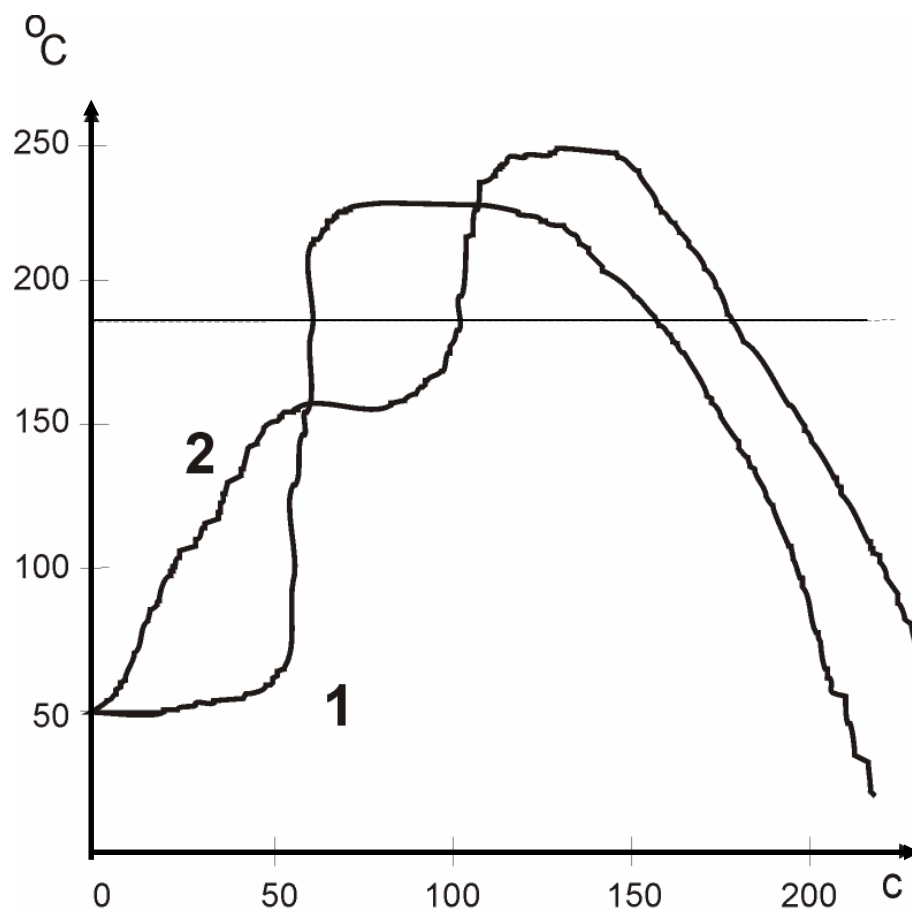


Рис. 43. Сравнение методов пайки
1-пайка в парогазовой фазе; 2-ИК пайка.



Рис. 44. График испытаний.
1-срезающее усилие (Н)
2-перемещение срезающего крюка (мм)

Таблица 21

Характеристики	Пайка в парогазовой среде	Инфракрасная пайка □
Скорость нагрева	Очень высокая	Низкая/средняя, в зависимости от мощности и скорости движения ленты
Температура припоя	Определена точкой кипения паяльной жидкости	Переменная, зависит от мощности нагрева, скорости движения ленты и массы подлежащего пайке материала
Время пайки	Длительное	Длительное
Влияние массы и цвета подлежащего пайке материала на температурный профиль	Незначительное и отсутствует	Незначительное/значительное в зависимости от скорости движения ленты и длины волны излучателя
Скорость охлаждения	Низкая	Низкая/средняя в зависимости от скорости движения ленты и дополнительного вентилятора
`TOMBSTONE`-эффект	Возникает часто, Особенно у Сопротивлений	Возникает редко
Обслуживание	Несложное	Несложное
Затраты на техническое обслуживание	Высокие	Малые
Нагрузка на окружающую среду	Средняя/высокая	Незначительная
Капвложения	Высокие	Низкие/средние
Эксплуатационные Расходы	Высокие	Низкие

Есть основания предполагать действие всех четырех причин, причем первая является наиболее существенной.

С целью исследования влияния клея на качество сборки, на ПП были наклеены 10 резистивных чип-компонентов типа 1206, после чего они прошли обработку в печи на отверждение клея и подверглись двухкратной обработке с помощью одной волны припоя. После этого была измерена средняя устойчивость к воздействию срезающего усилия, которая равна 53 Н, что обусловлено главным образом наличием клея.

При анализе срезов, а также при подробном рассмотрении мест пайки видно, что при пайке волной зачастую наносится большее количество припоя, нежели чем при дозированном способе. При этом образцы, прошедшие пайку волной припоя, имеют более тонкую структуру, чем соответствующие образцы, прошедшие пайку оплавлением дозированного припоя в ИК-печи.

Наблюдаемые на срезе поры, которые возникают в местах пайки в ИК-печи, проявляются более отчетливо и в большом количестве в местах разрушения после испытаний с использованием срезающих усилий. Поскольку преобладающая часть образцов разрушалась на границе поверхностей "металлизированная поверхность контактной площадки компонента / припой" и в этой области было установлено наибольшее количество пор, то можно предположить, что уменьшение общей площади соприкосновения контактов в месте пайки обуславливает снижение устойчивости к воздействию срезающих усилий.

Остается исследовать вопрос и выяснить, а потом и снять причины появления пор с целью устранения этих слабых мест.

3.5. Паяльная паста

Паяльные пасты состоят из плавких металлических частиц (паяльный порошок), флюса (чаще всего смола) и добавок для достижения необходимых специфических свойств.

Требования к паяльным пастам:

- отсутствие эффекта комкования припоя, который характеризуется разбрызгиванием отдельных нерасплавленных частиц припоя в процессе пайки;
- способность к капиллярному подъему и распространению;
- отсутствие опасности коррозии за счет окисления частиц припоя;
- несложная промывка, которая в основном зависит от флюса;
- однородность и удобство нанесения;
- хорошая тиксотропная характеристика, т.е. хорошая текучесть в процессе трафаретной печати, хорошая формоустойчивость после нанесения;
- достаточная клейкость, т.е. избежание сползания конструктивных компонентов;
- достаточная способность к хранению: сгущение, потеря вязкости, возможное окисление;
- постоянное поддержание высокого качества при поставке.

Другими параметрами, которые могут выбираться в соответствии со специфическими условиями пайки и которые частично зависят от поставщиков, являются: со-

став припоя, флюс, форма и размер частиц, вязкость, доля содержания металла, время сушки.

Наиболее часто использующиеся в технологии припоев представляют собой сплавы олова (Sn) и свинца (Pb) в соотношении 63 % и 37 %. При таком соотношении, которое получило название эвтектического сплава, достигается самая нижняя точка плавления сплава олова и свинца, равная 183°C (эвтектическая температура). Температура плавления нелегированных олова и свинца составляет соответственно 232°C и 327°C и является значительно более высокой. В большинстве случаев в припой добавляют 2 % серебра (Ag), с помощью которого, с одной стороны, улучшается прочность и, с другой стороны, оказывается противодействие так называемому эффекту "растворения примесей". Здесь жидкое олово растворяет серебро, содержащееся, например, в серебряно-палладиевых печатных проводниках ПП и в металлизированных поверхностях конструктивных компонентов, что может повлечь за собой определенное увеличение хрупкости места пайки, которая еще более возрастает после нескольких процессов пайки. За счет наличия серебра в припое этот эффект уменьшается [47].

Определенные проблемы возникают при использовании позолоченных поверхностей контактных площадок конструктивных компонентов, так как в этом случае скорость разделения сплава в два раза выше по сравнению с серебром. По этой причине рекомендуется удалять с поверхности слой золота, после чего производить горячее лужение. Эта операция не может быть применима к микросхемам, у которых металлизированные выводы выполнены на основе золота и платины. В данном случае необходимо создание диффузионного барьера в форме добавки индия (In) в припой.

Для пайки в ИК-печи используется припой Sn62/Pb36/Ag2 %. Этот наиболее часто используемый припой имеет эвтектическую температуру 178°C , обеспечивает возможность создания высококачественных мест пайки, отличается от других лучшей устойчивостью к воздействию срезающих усилий и минимальной скоростью разрушения в соответствии с тестами на старение.

Для чувствительных к воздействию температуры конструктивных компонентов может использоваться также сплав Sn54/Pb26/In20 % с эвтектической температурой 145°C .

Без флюса пайка становится невозможной. Даже незначительное окисление предотвращает нормальное смачивание места пайки. Таким образом, цель использования флюса заключается в удалении окислов и органических загрязнений и в предотвращении образования новых окислов вследствие пайки.

Большинство паяльных паст базируется на флюсе в виде смолы, которая подразделяется на отдельные классы:

- чистая натуральная канифоль с органическими, не содержащими галогенов, активирующими добавками;
- чистая натуральная канифоль с добавками органических активаторов, обеспечивающие хорошую возможность промывки в спирте или в смеси воды и мыльного средства;

- флюс без канифоли. Остатки могут растворяться в воде и должны обязательно смываться.

Форму и размеры частиц припоя пользователи, в основном, определяют как сферическую, с минимальной поверхностью относительно объема и, следовательно, минимальной долей содержания окислов, причем сферические частицы большего размера отличаются лучшими соотношениями по сравнению с меньшими частицами. Для шаблонов трафаретной печати с 80 ячейками на дюйм используют в основном размер частиц 45 - 75 мкм, а для нанесения тончайших печатных проводников с использованием ткани со 120 ячейками на дюйм - 20-45 мкм. Для устройства нанесения дозированного припоя с помощью иглы эта величина составляет 75-120 мкм.

Под вязкостью понимают вязкотекучесть пасты. Она зависит от различных факторов, например, доля твердых частиц во флюсе, содержание паяльного порошка, размера зерен и формы паяльного порошка. Доля содержания натуральной канифоли основополагающим образом определяет пастообразное состояние паяльной пасты и одновременно отвечает за клеящую способность, за счет которой компонент удерживается на плате до момента пайки. В тесной взаимосвязи с вязкостью находится тиксотропная характеристика, это означает, что паста под воздействием давления должна характеризоваться большей текучестью, а при устранении давления вновь должна становиться вязкотекучей и жесткой. Таким образом, паста не должна расползаться после завершения трафаретной печати и попадать на схему, а сохраняться с четкими контурами. Вязкость может быть уменьшена с помощью растворителя, который должен добавляться по каплям и соответствовать, рекомендованному изготовителем, типу.

Если состав припойной пасты имеет недостаточную вязкость, то паста будет растекаться или "расползаться", что приведет к потере точности рисунка, а это, в свою очередь, может послужить причиной образования шариков припоя или перемычек в процессе пайки или капать на плату из иглы дозатора при дозированном способе нанесения припоя. Для уменьшения растекания припойной пасты по плате рекомендуется увеличить процентное содержание порошка припоя или изменить химический состав флюса, путем введения в него специальных вяжущих добавок (загустителей).

Флюс должен удалять окислы с паяных поверхностей при пайке. Для этого должен быть правильно выбран температурно-временной режим пайки. Если во время разогрева платы температура будет повышаться слишком быстро, то растворитель, входящий в состав флюса, сразу испарится, что приведет к потере активности флюса и разложению или выгоранию его компонентов. При этом расплавление припоя осуществляется неравномерно, а процесс и результат пайки непредсказуемы.

Если же нагревательный цикл завершен преждевременно, то в местах пайки могут быть не полностью удалены окислы, что впоследствии приведет к разрушению паяного соединения.

Повторное использование припойной пасты не допускается. Время между нанесением пасты и пайкой должно быть минимальным и не превышать 24 часов.

Для реализации сборки в ТПМ выпускают различные пасты: водорастворимые пасты (ПЛ-111) и спирторастворимые пасты (ПЛ-112, П-312).

Кроме того, существует много разновидностей паст с различными связующими составами и с разной температурой пайки.

В отечественной практике нашла широкое применение припойная паста ПЛ-112 АУК0.029.009 ТУ. Для ее приготовления используется следующая последовательность: 10г флюса связки смешивается с 90г мелкодисперсного порошка припоя ПОС-61. В ступке компоненты тщательно перемешиваются пестиком, во флюс постепенно добавляется порошок припоя в течение 15 – 20 мин. Хранить пасту следует в герметичной закрытой таре при температуре 5 °С для избежания расслоения.

Перед применением пасту тщательно перемешивают и наносят через трафарет или специальным дозатором. Температурно-временной режим, использующийся для оплавления припойной пасты, приведен в табл.22.

Таблица 22.

№ Зоны пайки	1	2	3	4
Температура в зоне, °С	170	180	200	230
Время нахождения в зоне, сек	30	30	30	30

Остатки флюс-связки после оплавления следует удалять одним из следующих способов:

- ультразвуковой очисткой в диапазоне частот 18 - 50 кГц, мощностью 0,4 - 0,6 Вт/см², с амплитудой 0,4 - 0,6 мкм, растворителем метилен хлористый и хладон 114 в соотношении 55 % и 45 % соответственно последовательно в двух ваннах в течение 2 минут;

- очисткой в кипящих растворителях (метилен хлористый и хладон 114 в соотношении 55 % и 45 %) последовательно в трех ваннах по 3 минуты в каждой;

- ручной очисткой растворителями (метилен хлористый и хладон 114 в соотношении 55 % и 45 % или трихлорэтиленом) с помощью кисти, щетки или тампоном в течение 2 - 4 минут;

- тщательной очисткой в спиртоацетоновой смеси (1:1) либо в спиртобензиновой смеси (1:1) с помощью кисти, щетки или тампоном в течение 4 минут [18].

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Варианты реализации поверхностного монтажа.
2. Особенности вариантов реализации ТПМ.
3. Сущность чисто поверхностного монтажа.
4. Достоинства и недостатки чисто поверхностного монтажа.
5. Объясните понятие " смешанно-разнесенный монтаж ".
6. Варианты смешанно-разнесенного монтажа.

7. Достоинства и недостатки смешанно-разнесенного монтажа.
8. Сущность смешанного монтажа.
9. Варианты смешанного монтажа.
10. Достоинства и недостатки смешанного монтажа.
11. Какие методы пайки применяются в ТПМ?
12. Для каких компонентов допустима пайка двойной волной припоя?
13. Требования к первой и второй волне припоя.
14. Назначение второй волны припоя.
15. Недостатки пайки двойной волной припоя.
16. Сущность пайки в парогазовой фазе.
17. За счет чего осуществляется нагрев изделия в установке пайки в парогазовой фазе?
18. Что получают открытые участки поверхности изделия при пайке в парогазовой фазе?
19. Когда прекращается нагрев платы в парогазовой фазе?
20. Недостатки пайки в парогазовой фазе.
21. Сущность пайки в ИК-печи.
22. Достоинства пайки в ИК-печи.
23. Поясните процесс пайки в ИК-печи, используя временно-температурную кривую процесса.
24. Недостатки пайки в ИК-печи.
25. Мероприятия по улучшению характеристик ИК-печи.
26. Эффект " абсолютно черного тела " и мероприятия по его устранению.
27. Назначение зон в ИК-печи.
28. Другие методы пайки.
29. Главное отличие лазерной пайки от всех представленных методов пайки.
30. Достоинства лазерной пайки.
31. Область применения лазерной пайки.
32. Сравните пайку в парогазовой фазе с пайкой в ИК-печи.
33. Сравните пайку в ИК-печи с пайкой волной припоя.
34. Причины, обуславливающие более высокое качество пайки волной припоя в сравнении с ИК-пайкой.
35. Из каких компонентов состоит паяльная паста?
36. Какие требования предъявляются к паяльным пастам?
37. Что такое эвтектический сплав?
38. Для каких целей в состав припоя добавляют серебро?
39. Какой металл добавляют в припой для снижения эффекта " растворения " выводов компонентов на основе золота?
40. Для какой цели используется флюс в составе паяльной пасты?
41. Что такое вязкость припойной пасты?
42. От чего зависит вязкость припойной пасты?
43. Объясните понятие " тиксотропность пасты ".
44. Приведите марки отечественных паст.
45. Способы очистки плат от остатков флюса.

4. НАДЕЖНОСТЬ. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Для паяных соединений в ТПМ должен надежно обеспечиваться срок службы длительностью 10 лет и более, превышающий срок службы устройства или системы, в составе которой они используются. По этой причине необходимо произвести оценку надежности с помощью пригодных и эффективных методов. Для оценки мест пайки имеется целый ряд методов, которые в прямой или косвенной форме позволяют сделать соответствующий вывод о работоспособности изделий. Среди этих методов можно отметить следующие:

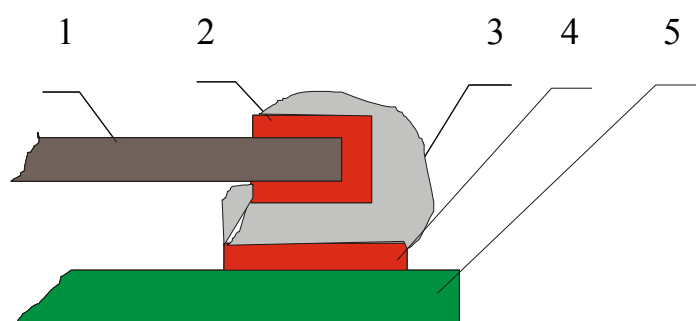
- визуальная оценка поверхностей пайки в отношении пор, трещин, неполного оплавления;
- микроскопическая оценка металлографических участков в отношении пор, трещин, однородности и зернистости структуры;
- оценка профиля места пайки;
- измерение объемного сопротивления;
- определение таких механических характеристик, как прочность на растяжение, прочность при воздействии срезающих усилий, работа на разрушение;
- контроль функционирования;
- оценка теплопроводности после нагрева с помощью импульсного лазерного излучения;
- оценка распространения звука после приложения акустического сигнала.

Визуальная и микроскопическая оценки пор, трещин, однородности и зернистости структуры довольно подробно представлена в [13,18,25]. Два последних метода еще находятся на стадии лабораторных исследований, и их широкое использование зависит не только от расходов на аппаратные средства, но и от воспроизводимости результатов. Поэтому рассмотрим оставшиеся методы оценки надежности паяного соединения.

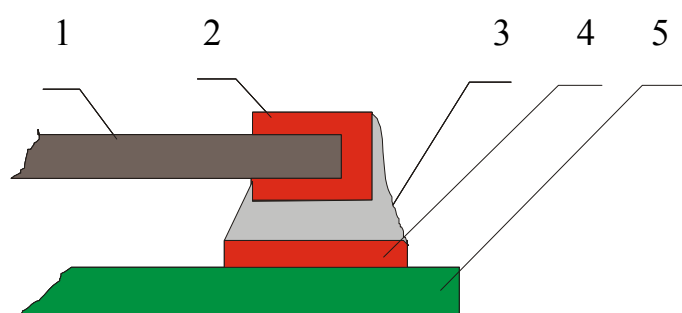
4.1. Профиль места пайки

На качество паяного соединения большое влияние оказывает профиль места пайки, который зависит от количества нанесенной паяльной пасты в процессе трафаретной печати. В общем случае специалисты считают, что удачным является профиль, изображенный на рис. 45, б, где доминирует легкая выпуклость в наружном направлении без закрытия конструктивного компонента сверху. Слишком большое количество припоя (рис. 45, а) увеличивает жесткость соединения и характеризуется склонностью к растрескиванию, как и в тонких местах (рис. 45, в), что обусловлено недостаточным количеством припоя [52]. Эти профили находятся в прямой зависимости от количества наносимой припойной пасты, которое, в свою очередь, пропорционально размерам припойной площадки знакоместа.

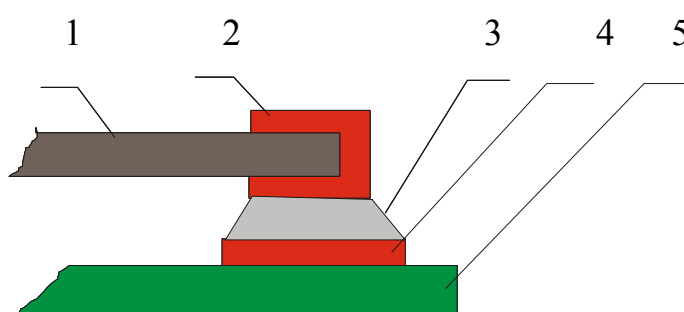
В отечественной промышленности разработаны и серийно выпускаются чип - резисторы типа P1-12 в соответствии с ТУ ОЖ0.467.169, например, класса 1206 с размерами (рис.46, а)



а) вся контактная площадка закрыта припоем



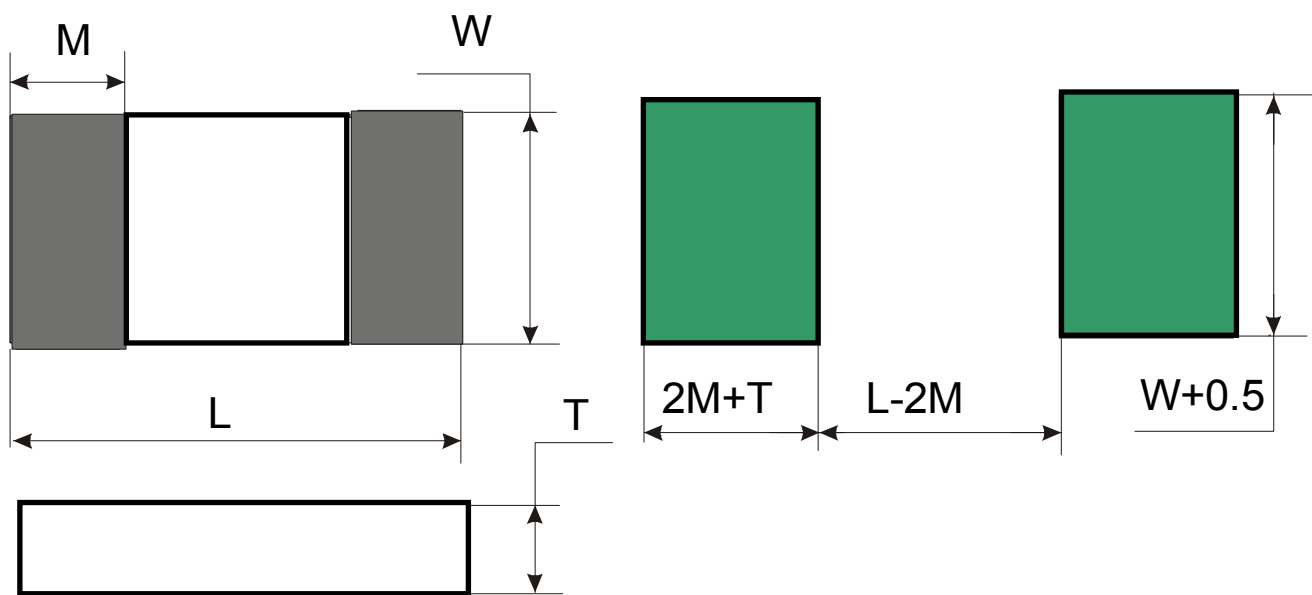
б) пайка с четырёх сторон



в) компонент на припое

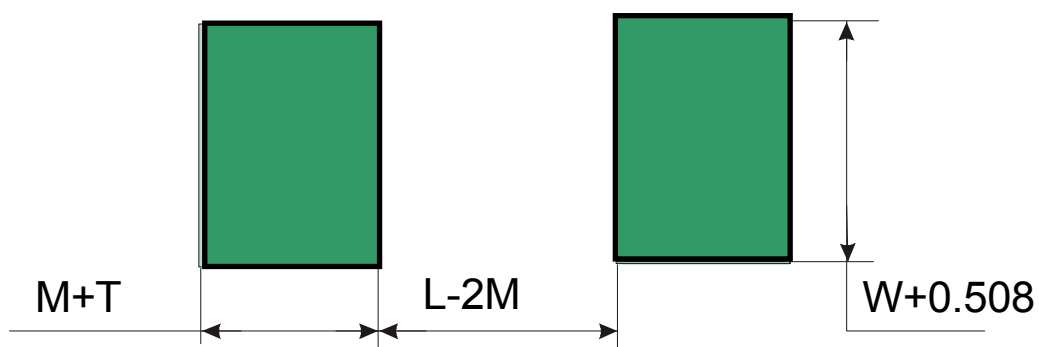
Рис.45. Профили места пайки:

1 - корпус; 2 - контактная площадка компонента; 3 - припой;
4 - припойная площадка; 5 - печатная плата

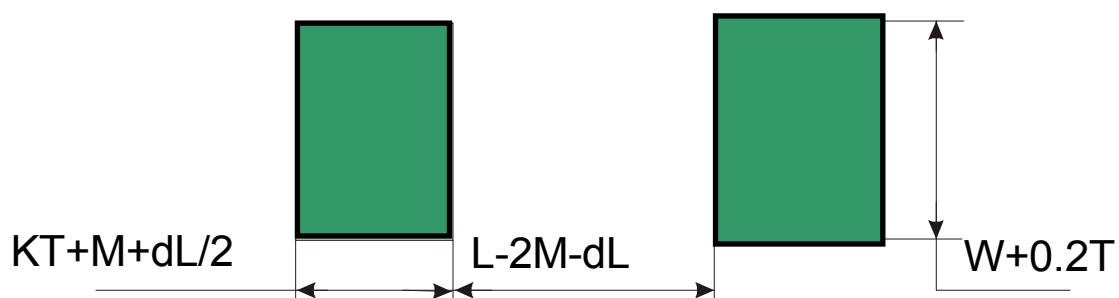


а)

б)



в)



г)

Рис.46. Варианты знакоместа компонента:

L - длина; W - ширина; T - высота; M - ширина контактной площадки; dL - допуск длины компонента; K - коэффициент

$$L=3,2 (+0,15 -0,2); T=0,6 (+0,2 -0,1); W=1,6 (\pm 0,15); M=0,4 (\pm 0,2).$$

Исходя из реальных размеров отечественного чип-резистора и формул для определения рекомендуемого знакоместа, получим размеры припойных площадок 1,4×2,1 мм и 1,0×2,108 мм для (рис.46,б, в) фирм “RCD Components Corp.” и “NU-Grafix Corp.”, соответственно.

С учётом практических и теоретических разработок по этому вопросу автором предложено (см. рис.46, г) соотношение между габаритными размерами компонента и знакоместа [34,35]. При этом получены размеры припойных площадок 0,67×1,72 мм.

После выбора размеров припойных площадок на знакоместо наносят припойную пасту, затем осуществляют позиционирование компонентов и пайку расплавлением дозированного припоя. При расплавлении припоя происходит скольжение компонента по расплавленному припою, обусловленное действием сил поверхностного натяжения в жидкости, которые стремятся затянуть контактную площадку компонента в центр припойной площадки печатной платы, и формирование профиля места пайки (рис.45).

Для формирования качественной пайки толщина влажного слоя паяльной пасты должна составлять 200...250 мкм [26]. При такой толщине пасты профиль места пайки на (рис.45, а) будет соответствовать топологии на (рис.46,б), а профили на (рис.45, б, в) - топологиям на (рис.46, в, г).

Проведем исследование надёжности профиля места пайки с точки зрения вибронадежности аппаратуры, испытываемой на гармоническую вибрацию. Для этого рассмотрим все три профиля места пайки и приближённую модель закрепления компонента в виде закреплённой с двух сторон пластины (рис.47). Эта модель отражает крепление компонента (пластины) с помощью паяного соединения. Допустим, что вдоль краёв внешняя вибрация с частотой $\omega=2\pi f$ и амплитудой Q возбуждает в плате и в компоненте гармонические колебания с амплитудой [14]

$$U(x) = \frac{sh(KL/2) \cos K(x - L/2) + \sin(KL/2) ch K(x - L/2)}{ch(KL/2) \sin(KL/2) + sh(KL/2) \cos(KL/2)} \cdot Q,$$

где

$$K = \sqrt{\sqrt{12\rho\omega^2(1-\nu^2)}/ET^2}.$$

E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала пластины;

T – толщина пластины.

Каждый профиль места пайки определен толщиной наносимого припоя и геометрическими параметрами припойной площадки знакоместа, а, следовательно, каждый

воздействия от платы к компоненту y .

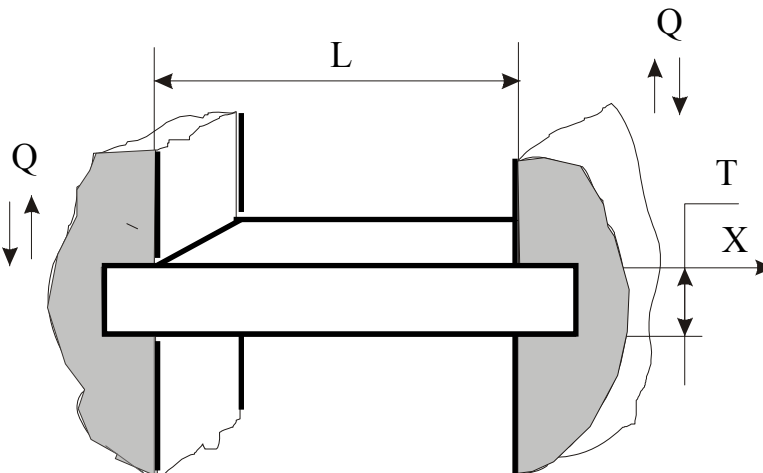


Рис.47. Модель крепления компонента

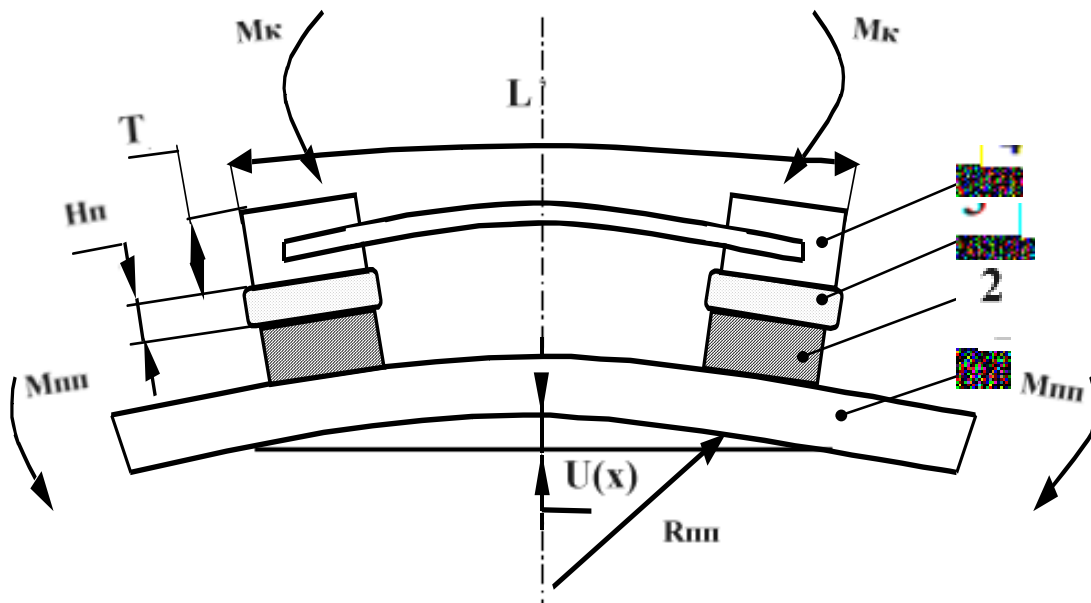


Рис. 48. Расчётная модель компонента
1 – печатная плата, 2 – припойная площадка,
3 – припой, 4 - компонент

При механических воздействиях важно оценить уровень механических напряжений, которые будут развиваться в компоненте и в паяном соединении при деформации платы. В этом случае необходимо оценить величины изгибающих моментов в плате и в самом компоненте. Рассмотрим расчетную модель на рис.48.

Известно, что изгибающий момент $M_{\text{ПП}}$ в печатной плате связан с радиусом её изгиба следующим соотношением

$$M_{\text{ПП}} = (EJ)_{\text{ПП}} / R_{\text{ПП}},$$

где E – модуль упругости материала печатной платы; J – момент инерции печатной платы; $(EJ)_{\text{ПП}}$ – жесткость печатной платы на изгиб.

Если форму изгиба печатной платы аппроксимировать дугой окружности с радиусом $R_{\text{ПП}}$, то последний определяется выражением

$$R_{\text{ПП}} = (L^2 + 4U^2(x)) / (8U(x)),$$

где L – длина изгибающего участка платы; $U(x)$ – амплитуда колебаний платы.

Если предположить, что изгибающий момент в компоненте равен изгибающему моменту в печатной плате ($M_K = M_{\text{ПП}}$), то можно оценить величину радиуса изгиба компонента

$$R_K = (EJ)_S / M_K,$$

где $(EJ)_S$ – суммарная жесткость компонента $(EJ)_K$ и паяного соединения $(EJ)_П$.

$$(EJ)_S = \frac{(EJ)_K (EJ)_П}{(EJ)_K + (EJ)_П}.$$

Тогда максимальное механическое напряжение в компоненте может быть определено по формуле [22]

$$\sigma = 0,5 E_K T M_{\text{ПП}} / (EJ)_S,$$

где E_K – модуль упругости материала компонента.

Окончательно формула примет вид

$$\sigma = \frac{4E_k TU(x)(EJ)_{ПП}}{(L^2 + 4U(x))(EJ)_s}.$$

После проведения имитационного моделирования ситуации деформации платы с паяными компонентами (Р1-12) и припойными площадками знакоместа (см. рис.46,б, в, г) получаем соответственно механические напряжения $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (см. кривые 1,2,3 и прямую П на рис.49; σ_{Π} – предел прочности при изгибе).

Из приведенного материала следует, что топология знакоместа, представленная на (рис.46, г), является более надёжной по сравнению с другими вариантами.

4.2. Объемное сопротивление

Определение надежности места пайки вывода компонента на поверхности ПП может осуществляться непосредственно с помощью измерения объемного сопротивления. Повышение этого сопротивления под воздействием термических или механических нагрузок свидетельствует о повреждении вследствие образования трещин. В качестве предельных величин упоминаются как абсолютные значения, например, 3 МОм, так и относительное увеличение на 10 % [52].

Из практических опытов было установлено, что величина объемного сопротивления практически не зависит от повреждения мест пайки. В случае механического повреждения сопротивление R резко возрастает лишь непосредственно перед разрушением места пайки, хотя первые поверхностные трещины (1) были выявлены визуально уже значительно раньше (рис. 50).

Влияние образования трещин на изменение сопротивления должно усиливаться, если измерение сопротивления осуществляется не на одной ПП в плоском, нормальном состоянии, а на изогнутой плате в напряженном состоянии, когда следует ожидать максимального распространения трещин.

С этой целью ПП вместе с последовательно включенными и расположенными в продольном направлении низкоомными сопротивлениями конструктивной формы 1206 подвергается воздействию циклической изгибающей нагрузки с ходом 15 мм при частоте 12 циклов в минуту. С помощью электрической схемы объемное сопротивление измерялось два раза в секунду, и определялись максимальные и минимальные величины в интервале времени протяженностью 3 мин.

На рис. 51 приведена зависимость величины объемного сопротивления R от количества изгибающих циклов.

Было установлено непрерывное возрастание переходного сопротивления с одинаковым коэффициентом, как для ненагруженного, так и нагруженного состояния. Разность сопротивлений составляла в общей сложности 154 МОм, что соответствовало величине 4,3 МОм на один участок пайки.

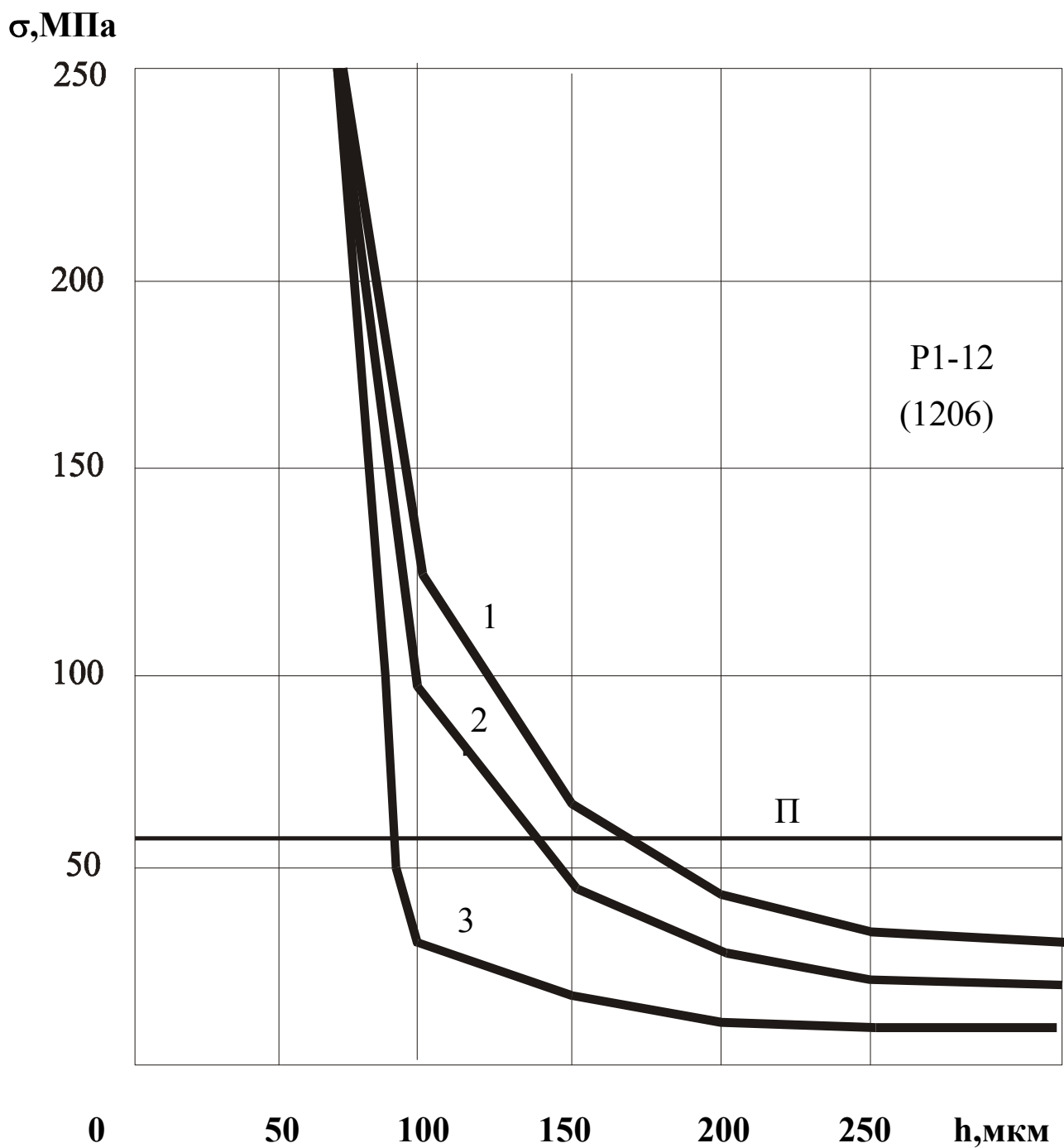


Рис.49. Зависимость механического напряжения σ в компоненте от толщины h паяльной пасты

Сразу после прекращения действия чередующейся нагрузки общее объемное сопротивление в течение нескольких минут уменьшается до уровня, лежащего приблизительно на 45 МОм выше (ненагруженной) исходной величины, т. е. остаточное изменение сопротивления, составляет для одного места пайки около 1,2 МОм.

На основании этого исследования можно сделать вывод о том, что места пайки относительно малых конструктивных компонентов отличаются относительно малой чувствительностью к весьма сильным изгибающим моментам и возникающие, в некоторых случаях, микроскопические трещины почти полностью смыкаются после завершения действия нагрузки.

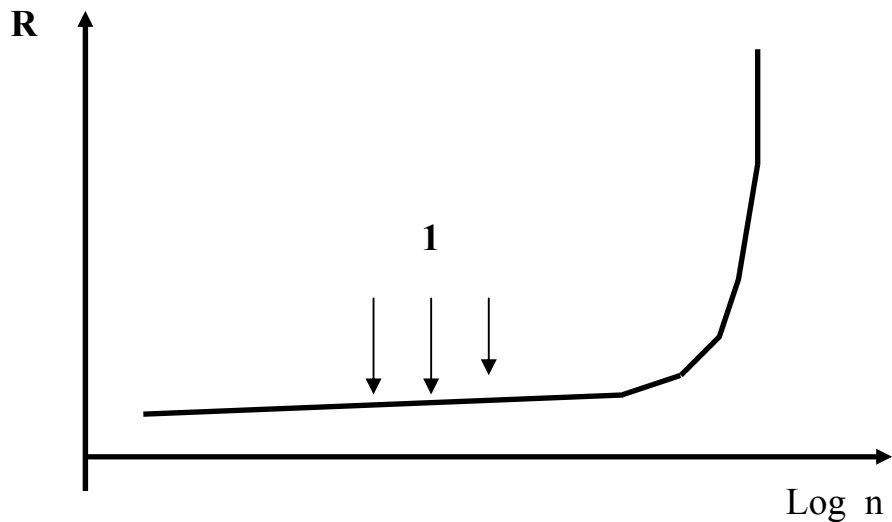


Рис.50. Зависимость объемного сопротивления паяного соединения от величины механического повреждения

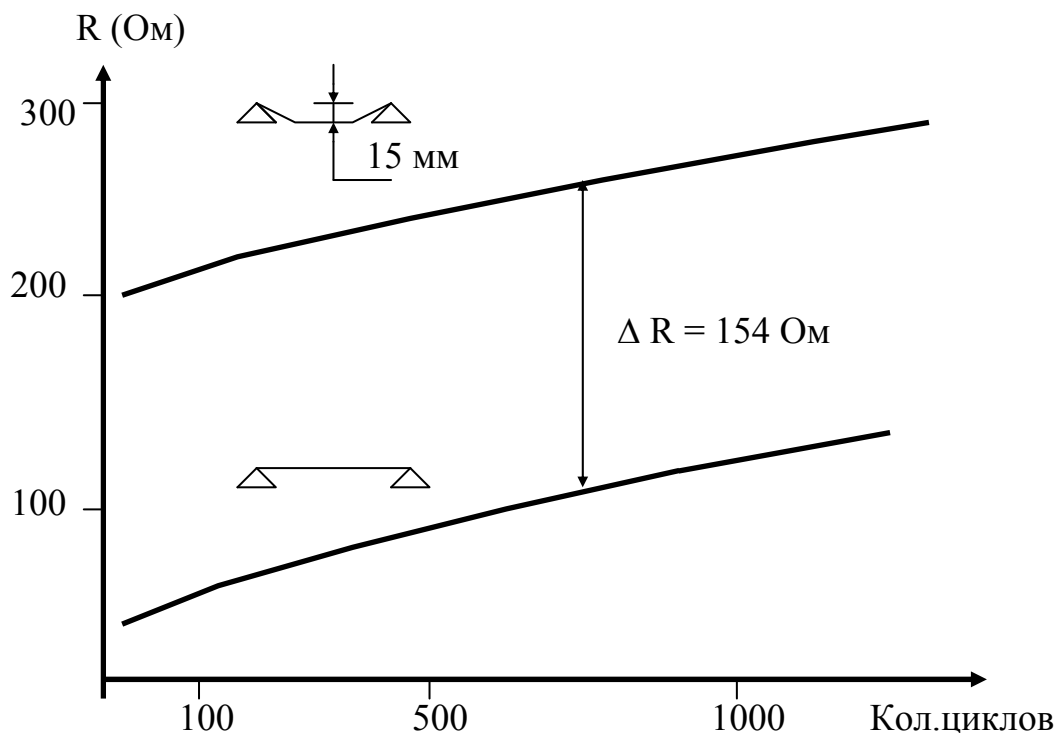


Рис. 51. Зависимость величины объемного сопротивления от количества изгибающих циклов

4.3. Механические воздействия

Любая электронная схема, не только относящаяся к числу мощных схем электроники, подвержена определенной термической нагрузке. В тепловом отношении конструктивные компоненты, в том числе резисторы, транзисторы, интегральные микросхемы, вырабатывают тепло за счет рассеяния выделяемой мощности, которое отводится в печатную плату через выводы и печатные проводники, нагружая при этом пассивные в тепловом отношении конструктивные компоненты, например, конденсаторы.

Критическим параметром, для оснащенных кристаллами полупроводников, является максимально допустимая температура запирающего слоя, а для прочих конструктивных компонентов - максимальная температура, допустимая для мест пайки.

За счет принятия соответствующих мероприятий (конструктивных или технологических решений) можно обеспечить хороший отвод тепла. В случае интегральных микросхем, например, за счет выбора другой формы и другого материала так называемой свинцовой рамки, т.е. за счет изменения конфигурации соединений внутри одной интегральной схемы, можно добиться существенного улучшения теплопроводности.

Практика показывает, что термическая устойчивость кристаллов сложных компонентов в большинстве своем не может быть рассмотрена, т.к. отвод тепла в печатную плату обуславливает преждевременное достижение температуры до 110°C , которая является критической для самих кристаллов. К тому же, за счет использования необходимых печатных проводников и увеличения расстояния между конструктивными компонентами, можно уменьшить термические нагрузки. Таким образом, если плотность монтажа не является экстремальной, то можно рассредоточить корпуса по печатным платам изделия и снизить температуру окружающей среды до 70°C .

Но в ТПМ существует другая опасность, связанная с термоциклированием, когда печатная плата постоянно подвергается воздействию в определенном ритме расширению (период эксплуатации) и сжатию (период покоя). Если характеристики теплового расширения ПП и конструктивных компонентов являются идентичными, то в этом случае всякая опасность для компонентов исключается. А если характеристики являются различными, например, вследствие различных ТКЛР, то это может привести к возникновению чрезмерных нагрузок и к разрушению мест пайки. Здесь решающее значение имеет гибкость конструктивного компонента [11].

В случае использования конструктивных компонентов типа SO и SOT, повреждения мест пайки практически исключены, т.к. гибкие в механическом отношении контактные площадки (выводы, рис.6-10) компенсируют напряжения без существенной нагрузки на места пайки. Считается также, что эта опасность не угрожает конструктивным чип-компонентам с общей длиной до 6 мм.

Сложные компоненты, которые имеют жесткие контактные площадки, могут использоваться только на керамических печатных платах или на согласованных по ТКЛР многослойных печатных платах. Такие многослойные ПП, как правило, со-

держат центральный слой типа Cu/Invar/Cu (Медь - Инвар - Медь) и с обеих сторон покрыты стекло - эпоксидным слоем.

К керамическим ПП из оксида алюминия все известные конструктивные компоненты могут припаиваться без каких-либо предварительных условий, вследствие согласованности по ТКЛР.

Несмотря на то, что места пайки пассивных компонентов являются менее опасными, против корпусов микросхем с большим количеством выводов, из-за своих незначительных размеров, необходимо проверить возможность возникновения и степень возможно ожидаемых отказов мест пайки под воздействием циклического изменения температуры.

С этой целью было проведено исследование мест пайки пассивных конструктивных компонентов типа 0805-1812, а также активных компонентов в корпусах типа SOT-23. При использовании той же паяльной пасты и того же ИК-температурного профиля была проведена пайка компонентов на печатной плате толщиной 1,5 мм. Толщина слоя паяльной пасты изменялась три раза, а именно 80, 100 и 250 мкм. Часть образцов подвергалась влиянию температурных циклов от -25°C до 85°C со временем воздействия по 4 ч и временем смены температуры 2 ч, а часть образцов - влиянию температурных циклов от -55°C до 125°C при времени воздействия 30 мин и времени смены температуры 10 мин.

С целью исследования устойчивости к срезающему усилию мест пайки печатная плата была зажата в держателе, а к компоненту прикладывалась боковая срезающая нагрузка в виде крюка, который цеплялся за корпус компонента. Используемый для приложения срезающего усилия крюк располагался на поперечной траверсе механического испытательного устройства, которое выдавало аналоговые сигналы, относящиеся к усилию и пути (рис. 52). После аналого-цифрового преобразователя пара значений усилие-путь вводилась в персональный компьютер, который отображал зависимость на экране.

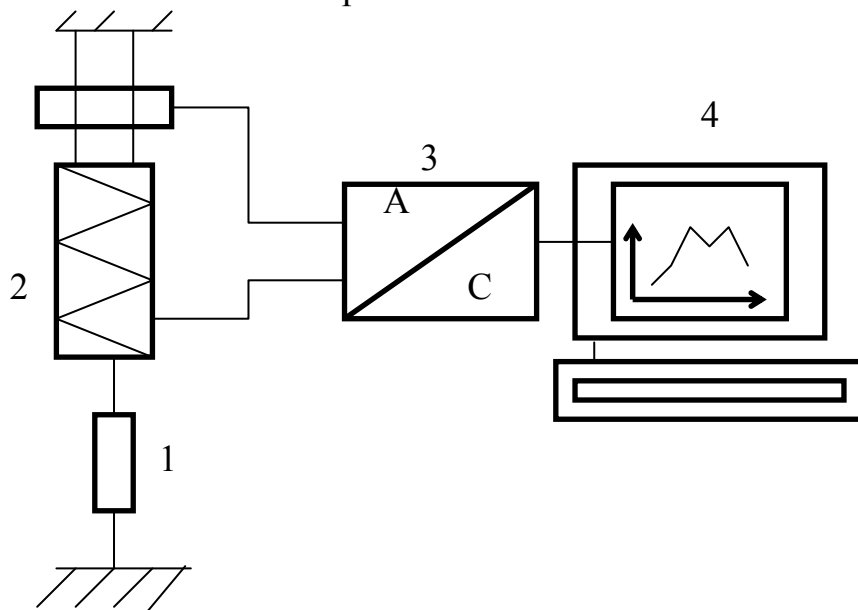


Рис. 52. Схема испытательного устройства:
1-компонент; 2-крюк; 3-аналого-цифровой преобразователь; 4-ПК

Результаты испытаний отображены на рис. 53, где показана зависимость срезающего усилия от пути крюка. В результате экспериментов выяснилось, что прилагаемое усилие к компоненту является довольно сложным, т. к. компоненты в ТПМ не могут точно самостоятельно центрироваться и поэтому располагаются, довольно часто, в наклонной позиции. Это ведет к тому, что график зависимости усилие/путь в худшем случае имеет два максимума с одинаковой величиной, поскольку оба места пайки "срезаются" поочередно.

Ранее приводилось, что толщина нанесенного слоя паяльной пасты решающим образом влияет на срок службы места пайки.

Устойчивость конструктивно различных компонентов к влиянию срезающих усилий в зависимости от толщины наносимой паяльной пасты представлена на рис.54, которая измерена без предварительного термоциклирования образца. На рис.55 представлена та же зависимость, но образцы предварительно были подвергнуты воздействию 100 циклов $-25/85^{\circ}\text{C}$.

Характерными являются также различия в устойчивости к срезающим усилиям для конструктивно различных форм компонентов. Чем больше металлизированная поверхность контактной площадки конструктивного компонента, тем выше прочность места пайки. Конструктивные компоненты типа MINI-MELF (размер 0204) отличаются меньшей прочностью, вследствие малой площади контактных площадок, приблизительно на 23% по сравнению с компонентами квадратной формы или компонентами конструктивной формы типа 1206. Для резистора P1 – 12 (1206), который устанавливался на знакоместо (рис. 46, г) и определял профиль места пайки (рис. 45, в), были проведены исследования устойчивости места пайки к срезающему усилию, представленные на рис. 56.

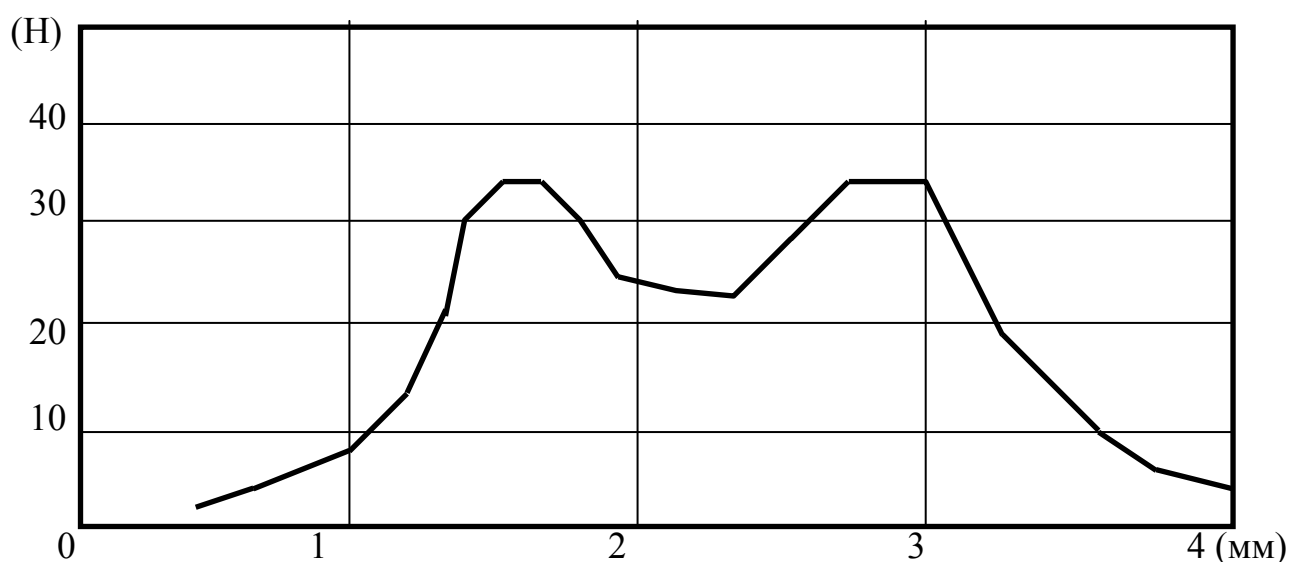


Рис. 53. Зависимость срезающего усилия от пути срезающего крюка

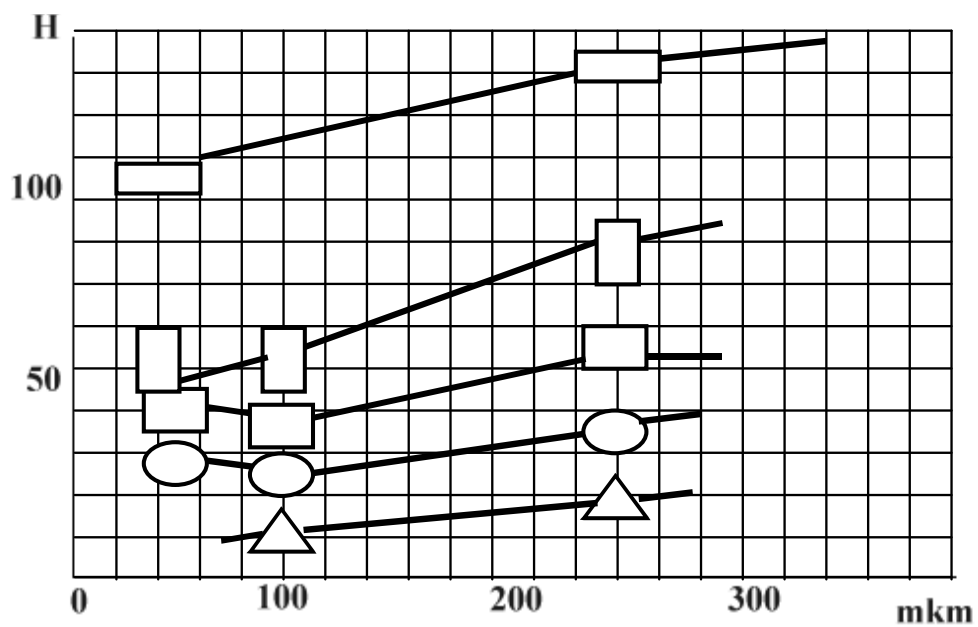


Рис .54. Зависимость срезающего усилия
от толщины паяльной пасты без
термоциклирования

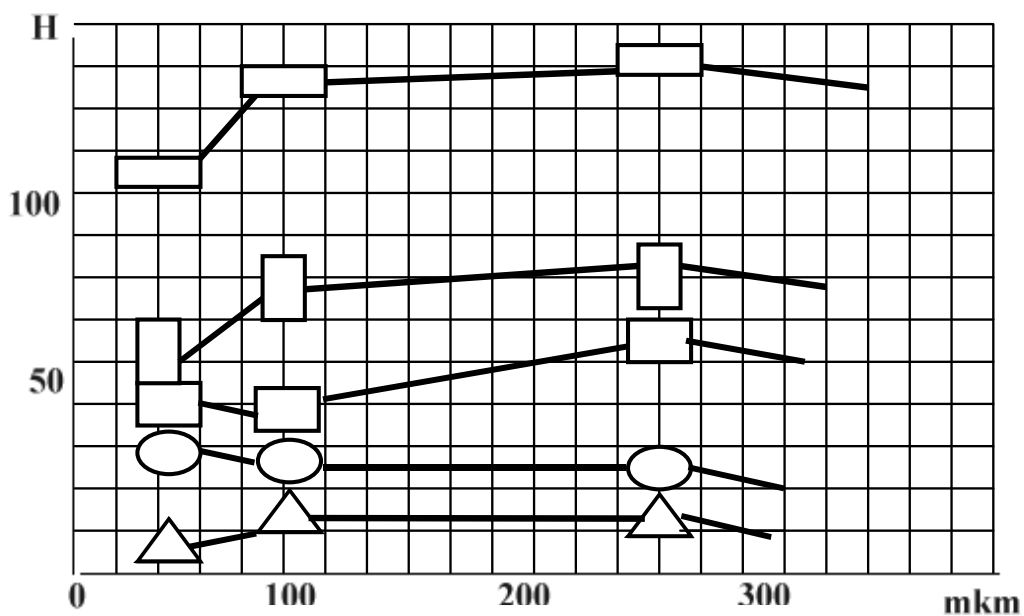
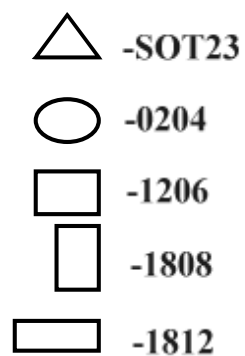


Рис .55. Зависимость срезающего усилия
от толщины паяльной пасты после
термоциклирования

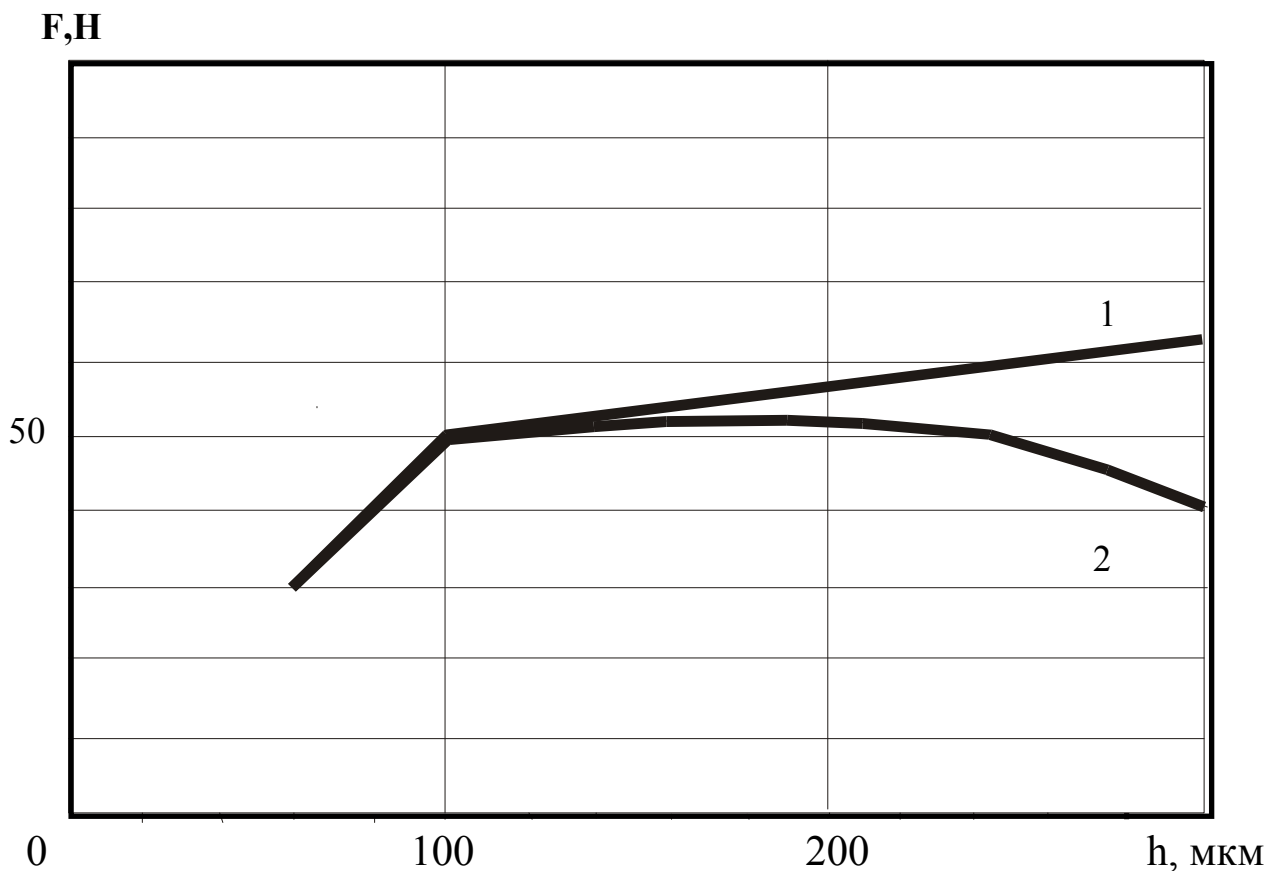


Рис. 56. Зависимости (1,2) сдвигающего усилия F от толщины паяльной пасты h до и после термоциклирования

Зависимость измерена до предварительного термоциклирования образцов паяного соединения и после (50 циклов от -25 до $+85$ °С).

Анализ показал, что для слоя паяльной пасты толщиной 250 мкм в сравнении с толщиной в 100 мкм характерно увеличение устойчивости к влиянию сдвигающих усилий на 10-25 % в исходном состоянии (кривая 1) или уменьшение на 18-20 % после 50 температурных циклов (кривая 2, рис.56). Слишком большое количество припоя приводит к увеличению жёсткости места соединения «контактная площадка компонента-припойная площадка печатной платы», которое становится хрупким к тепловой нагрузке.

Таким образом, надёжность пайки зависит от конструктивных особенностей профиля места пайки, определяемых геометрией припойной площадки, и от количества наносимого припоя на знакоместо компонента. При этом, в отличие от сложившейся практики, рекомендуем в технологии поверхностного монтажа тополо-

гию знакоместа для чип – компонента определять из (рис.46, г), а толщину припойной пасты выбирать в пределах 100...200 мкм.

Далее оценим влияние температуры на качество изделия. Различные температурные коэффициенты линейного расширения основания печатной платы и поверхностно – монтируемых компонентов при больших перепадах температуры (термоциклировании) приводят к появлению механических напряжений в компонентах, которые становятся причиной существенных деформаций конструкции, снижения надёжности функционирования. Эти напряжения через механизм термоупругости усиливают температурные флуктуации, которые могут быть также причиной помех в электрическом тракте устройства.

Рассмотрим поверхностно – монтируемый компонент прямоугольной формы размером $l \times b \times h$ с моментом инерции J ($J = bh^3 / 12$). Из-за разницы ТКЛР основания и компонента при повышении температуры на $\Delta t = t - t_0$ (t_0 – нормальная температура, когда механические напряжения отсутствуют), в компоненте возникают напряжения, в результате которых потенциальная энергия, необходимая для возникновения деформации w компонента, будет определяться выражением [50]:

$$P = \frac{EJ}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 dx - \frac{\alpha ES}{2} \Delta t \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx.$$

Здесь E – модуль Юнга, α - ТКЛР, S – площадь поперечного сечения ($S=b \times h$).

Кинетическая энергия определяется по формуле:

$$F = \frac{\rho S}{2} \int_0^l \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 dx,$$

где ρ - погонная плотность материала, l – длина компонента.

Деформация компонента в виде прогиба w можно выразить через обобщённые координаты следующим образом:

$$w = \sum_{n=1}^{\infty} w_n(t) \sin \frac{n\pi x}{l},$$

где n – количество обобщённых координат.

Тогда приходим к функции распределения вероятностей для этих энергий в виде:

$$P = const \exp \left\{ - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{E}{kt} \frac{l}{4} \left[J \frac{n^4 \pi^4}{l^4} - \alpha S \Delta t \frac{n^2 \pi^2}{l^2} \right] w_n^2 - \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M}{kt} w_n^2 \right\},$$

где M – масса компонента, k – постоянная Больцмана.

Откуда находим средне-квадратичное отклонение (с.к.о.) интенсивности случайных значений напряжений в компоненте по формуле:

$$\sigma_H = \frac{\sqrt{2klt}}{n\pi \sqrt{E \left[\frac{n^2 \pi^2}{l} J - \alpha S \Delta t \right]}}. \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что интенсивность случайных колебаний напряжений может достигнуть очень больших значений за счёт приближения температуры к критическому значению $\Delta t = \pi^2 J / \alpha S l^2$, которая может привести к выходу из строя компонента и снижению вероятности безотказной работы.

Из вышеприведённого возникает задача, оценки надёжности функционирования проектируемого устройства РЭС при варьируемых параметрах материала конструкции и заданных значениях внешней температуры окружающей среды.

Допустим, что плотность распределения напряжения H подчиняется нормальному закону и имеет вид [10]:

$$f(H) = \frac{1}{\sigma_H \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H - \mu_H}{\sigma_H} \right)^2 \right], \quad -\infty \leq H \leq \infty,$$

плотность распределения прочности Π также подчиняется нормальному закону в виде:

$$f(\Pi) = \frac{1}{\sigma_\Pi \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Pi - \mu_\Pi}{\sigma_\Pi} \right)^2 \right], \quad -\infty \leq \Pi \leq \infty.$$

Здесь μ_H , μ_Π – математические ожидания (м.о.) напряжения и прочности соответственно, σ_H , σ_Π – с.к.о. напряжения и прочности соответственно.

Введём случайную величину $y = H - \Pi$. Известно, что случайная величина y подчиняется нормальному закону распределения с м.о. $\mu_y = (\mu_\Pi - \mu_H)$ и с.к.о.

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_\Pi^2 + \sigma_H^2},$$

представленному на рис.57. Из рисунка видно, что при $y > 0$ имеем безотказную работу, а при $y < 0$ – появление отказа изделия.

Тогда вероятность безотказной работы изделия можно выразить через y , как

$$R = P(y \geq 0) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(-\frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right] dy.$$

Если ввести $z = (y - \mu_y) / \sigma_y$, то $(\sigma_y \times dz) = dy$. При $y = 0$ нижний предел случайной величины z имеет вид:

$$Z = \frac{0 - \mu_y}{\sigma_y} = -\frac{\mu_{\Pi} - \mu_H}{\sqrt{\sigma_{\Pi}^2 + \sigma_H^2}}, \quad (2)$$

а при $y \rightarrow \infty$ верхний предел $z \rightarrow +\infty$. Следовательно, вероятность безотказной работы устройства определяется выражением

$$R = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{\mu_{\Pi} - \mu_H}{\sqrt{\sigma_{\Pi}^2 + \sigma_H^2}}}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (3)$$

Величина z является нормированной случайной величиной, распределённой по нормальному закону. Следовательно, вероятность безотказной работы можно найти с помощью таблиц функции нормального распределения или вычислить интеграл численным способом. Тогда формулу (3), при использовании таблицы можно записать в следующем виде:

$$R = 1 - \Phi \left(-\frac{\mu_{\Pi} - \mu_H}{\sqrt{\sigma_{\Pi}^2 + \sigma_H^2}} \right).$$

Рассмотрим пример. Допустим, что вследствие рабочей температуры при функционировании печатного узла в составе аппаратуры прочность материала компонента имеет случайные значения с нормальным распределением с м.о. 82 МПа и с.к.о. 8 МПа. Напряжение, возникающее в компоненте, также имеет нормальное распределение с м.о. 35 МПа и с.к.о. 4 МПа. Тогда из уравнения связи (2) находим величину $z = -5,22$, а из таблиц для нормального распределения определяем, что вероятность безотказной работы узла составляет 0,999999. Теперь большие колебания окружающей среды вызывают увеличение с.к.о. напряжения, рассчитанного по формуле (1), в компоненте до 15 МПа. Тогда $z = -2,76$ и вероятность безотказной работы уменьшается до 0,998776.

Таким образом, зная характеристики материалов конструктивных компонентов, предельные значения температуры эксплуатации изделия, можно оценить величину

механического напряжения в конструктивных компонентах, а следовательно, и диапазон устойчивой работы изделия [36].

Известно, что места пайки конструктивных компонентов в ТПМ повреждаются не столько от воздействия быстро меняющихся температур, сколько от длительного времени выдерживания при высокой температуре. Причиной этого являются изменения структуры места пайки вследствие термически активизированного роста зернистости.

Например, после 100 температурных циклов $-25^{\circ}\text{C} / 85^{\circ}\text{C}$ устойчивость к воздействию срезающих усилий уменьшается на 13 %, а при цикле $-55^{\circ}\text{C} / 125^{\circ}\text{C}$ уменьшение составляет только 7 % применительно к толщине слоя паяльной пасты 250 мкм. Уменьшение становится более значительным, если наносится слой паяльной пасты толщиной более 250 мкм. В этом случае прочность снижается на 21 - 31%.

На основании результатов исследований, проведенных автором, можно сделать следующие выводы:

- места пайки конструктивных компонентов с малыми размерами контактных площадок отличаются относительной нечувствительностью к воздействию интенсивных нагрузок;
- большая толщина нанесенного слоя паяльной пасты улучшает надежность места пайки, если изделие не подвергается термоциклированию;
- компоненты, прошедшие пайку волной, отличаются гораздо более высокой устойчивостью к воздействию срезающих усилий, нежели компоненты прошедшие пайку в ИК-печи, что обусловлено нанесенным клеем;

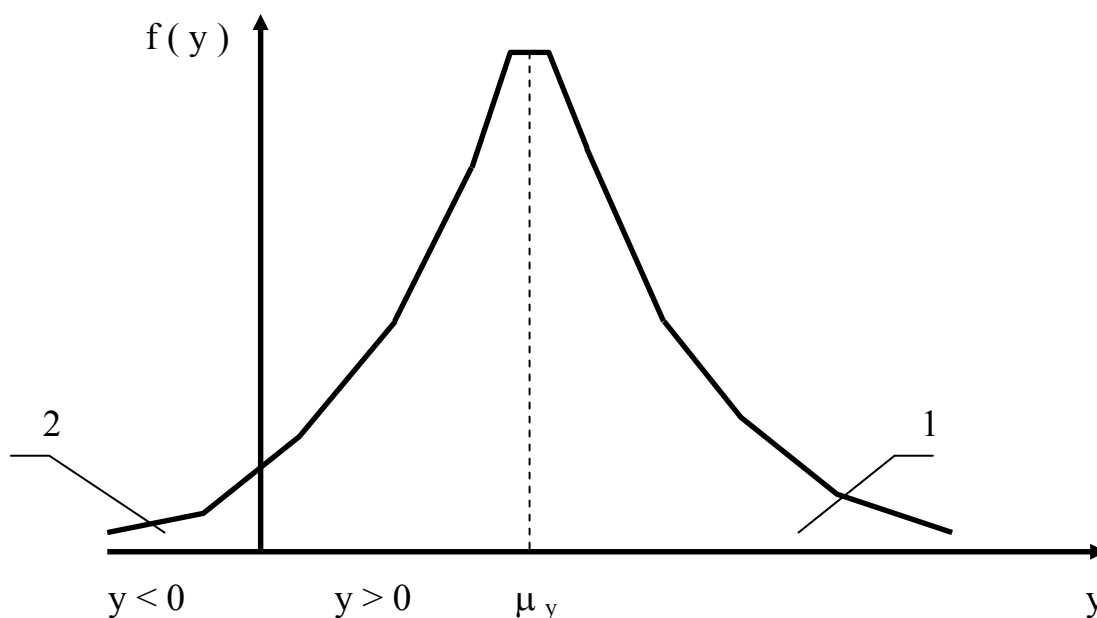


Рис. 57. Плотность распределения случайной величины y :
1 –вероятность безотказной работы; 2- вероятность отказа изделия

- слабым местом для реализации качественной пайки в ИК-печи являются поры, возникающие под контактной площадкой навесного компонента;

- для уменьшения количества пор необходимо оптимизировать температурный профиль для пайки в ИК-печи в зависимости от допустимой термической нагрузки на компоненты в ТПМ.

4.4. Контроль функционирования

Контроль функционирования электронных схем является весьма сложной задачей. Сама проверка в конечном итоге дает информацию о том, насколько удачным были предшествующие процессы, в частности, процессы при изготовлении.

При функциональном контроле проверяется эксплуатационная характеристика всего изделия (печатного узла) в целом во взаимосвязи его с периферией. Доступ осуществляется через разъем. В случае испытания типа “автономно” проверяются компоненты и качество контакта с печатной платой при их изоляции от схемы. При контроле аналоговых схем для этой цели используются, входящие в состав системы контроля, заземленные операционные усилители. В случае контроля цифровых схем на их входы (на входы компонентов) подаются кратковременные импульсы, которые регистрируются подключенными к выходам приемниками и сравниваются с данными в эталонной таблице. Контактное взаимодействие с компонентом обеспечивается с помощью игольчатого адаптера, испытательные иглы которого (несколько сотен на один печатный узел) захватывают все электрические узловых точки на печатной плате (рис. 58). При этом способе контроля должна учитываться плотность монтажа и минимальный шаг координатной сетки.

В качестве точек контроля могут рассматриваться увеличенные контактные площадки компонента, расширенные печатные проводники и сквозные контактные площадки (отверстия), представленные на рис.58.

По возможности для всех электрических узлов необходимо предусмотреть отдельные контрольные точки (рис.58, а) с минимальным диаметром 0,9 мм, покрытые припоем.

В случае печатных узлов с двухсторонним монтажом компонентов рекомендуется все контрольные точки располагать на одной стороне печатной платы, на стороне пайки.

Минимальные геометрические размеры топологии печатного рисунка вместе с контрольными точками приведены на рис. 59.

Если высота компонента до 3 мм, то величина $C > 2$ мм, а если высота компонента свыше 3 мм, то $C > 4$ мм.

Контрольная точка должна располагаться на минимальном расстоянии «С» от края контактной площадки компонента с целью достаточного удаления выемок для компонентов большой высоты в игольчатом адаптере от приемных отверстий контрольных игл.

Непосредственная установка испытательной иглы на контактную площадку компонента не рекомендуется по следующим причинам:

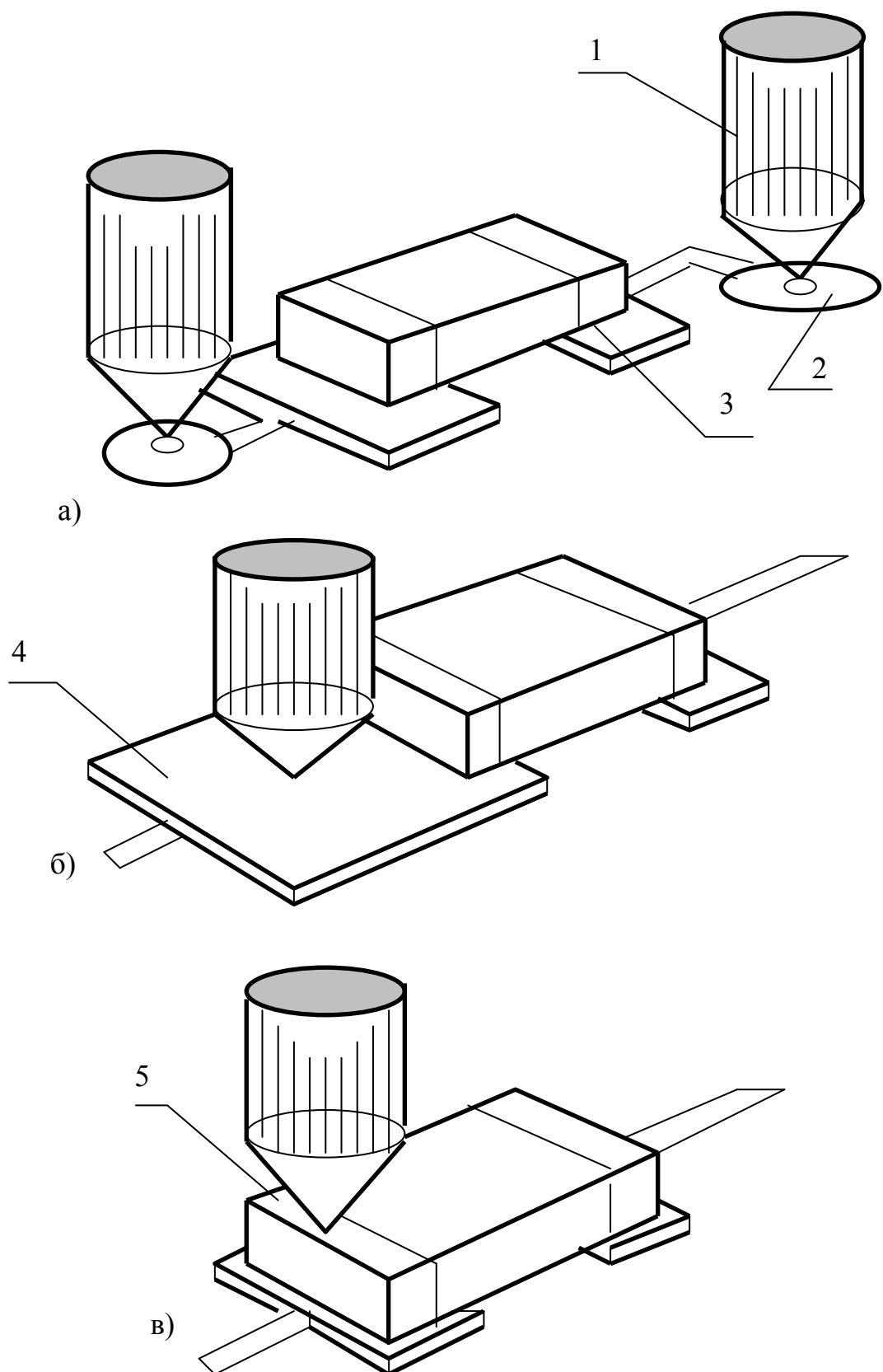


Рис. 58. Схема контроля компонента:
 1-игла адаптера; 2-контрольная площадка; 3-припой;
 4-припойная площадка; 5-контактная площадка; а-идеальный вариант;
 б-допустимо только для пайки волной припоя; в-недопустимо

- компоненты, контактные площадки которых не располагаются в дискретах шага координатной сетки, требуют использования так называемого безрастрового контрольного адаптера;
- для некоторых компонентов, например PLCC, конденсаторов с односторонней контактной площадкой, прямое контактирование является просто невозможным;
- контактные площадки, ширина которых составляет 0,2 мм и менее, не обеспечивают достаточной надежности попадания контрольной иглы;
- возможно повреждение компонента, особенно выполненных из керамических материалов;
- ошибочно выполненные паяные соединения под воздействием усилия нажима контрольных игл могут принять вид нормальных.

Для оценки качества печатных узлов, выполненных по ТПМ предложена программа контроля качества, которая позволяет обобщить качественные влияния конструкции ПУ, способа установки и пайки компонентов в одном числовом показателе качества. Этот показатель качества рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = 100 (1 - \text{dmp}_{BE} 10^{-6})^{N_{BE}} \cdot (1 - \text{dmp}_{BEST} 10^{-6})^{N_{BEST}} \cdot (1 - \text{dmp}_{lot} 10^{-6})^{N_{lot}}.$$

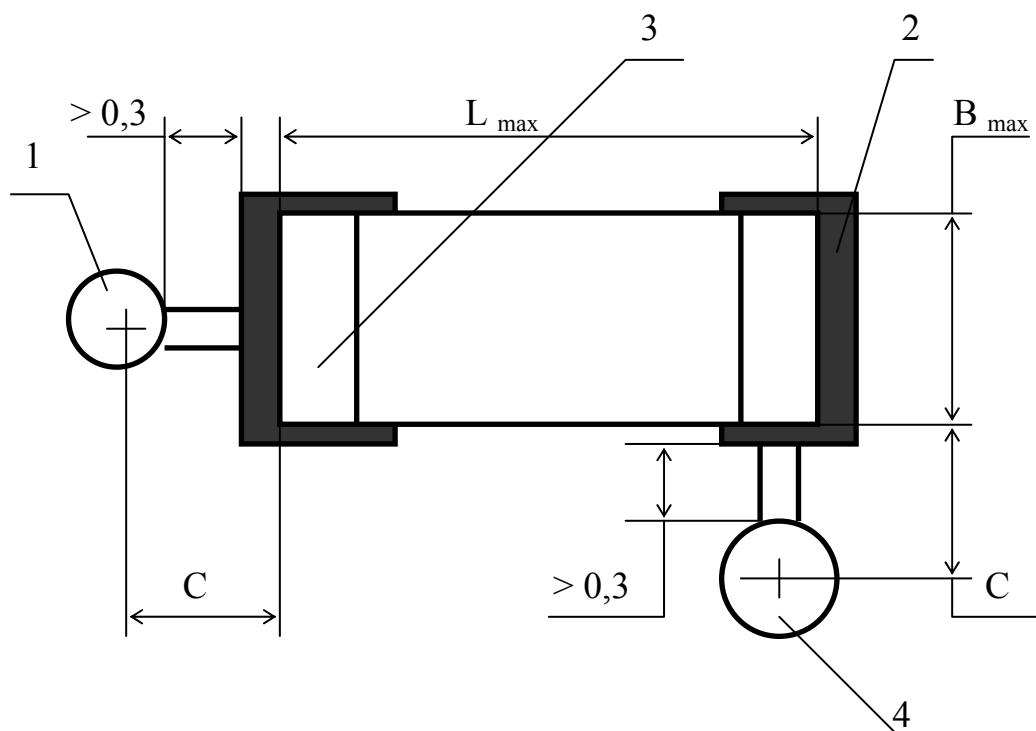


Рис. 59. Минимальные требования к топологии контрольных точек:
 1,4-контрольные точки; 2-припойная площадка;
 3-контактная площадка компонента; С- расстояние от центра иглы до края контактной площадки

Или по формуле $Q = \prod (1 - \text{dmp}_i \cdot 10^{-6})^{N_i}$,

где dmp_i – количество дефектов на миллион для i -й составляющей $i = \{ \text{BE}, \text{BEST}, \text{Iot} \}$; BE- компоненты; BEST – вариант операции установки компонентов на ПП; Iot- место пайки; N_i – количество составляющих на один печатный узел.

При бездефектном монтаже достигается величина $Q = 100$, $Q = 0,95$ говорит о том, что из 100 изготовленных печатных узлов 95 являются полностью исправными. Анализируя причины появления дефектов, специалисты по ТПМ предлагают меры по регулированию качества технологических процессов сборки изделия с целью исключения вероятностей последующего возникновения неисправностей в серийной продукции. На рис. 60, а, б приведены технологические процессы сборки ПУ без и с системой управления качеством соответственно.

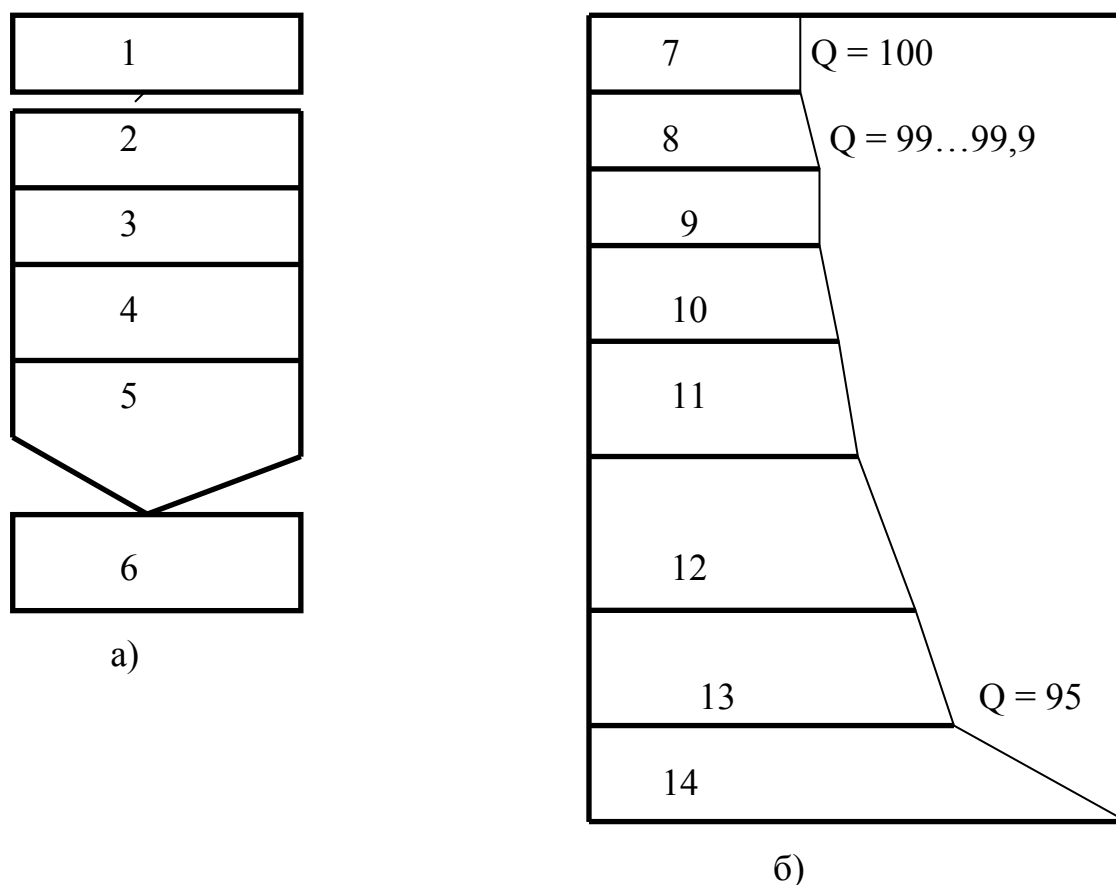


Рис. 60. Технологический процесс сборки печатного узла:

а) – без системы управления качеством; б)- с системой управления качеством;
 1- поставка компонентов; 2 – входной контроль комплектующих; 3 – сборка;
 4 – контроль сборки; 5 – проверка изделия; 6,7 – включение пользователем;
 8 – испытание изделия с периферийным и программируемым оборудованием;
 9 – функциональное испытание (имитация, эмуляция); 10 – испытание (In-circuit); 11 – испытание типа Short/open; 12 – визуальный контроль; 13 – сборка;
 14 – выходная проверка ПУ

Для достижения частоты повторения ошибок равной $100 \text{ dpm}_{\text{BEST}}$ при установке компонентов на ПП необходимо выполнить в среднем 10 тыс. операций установки без возникновения ошибок. Это означает, что при ручной установке с затратами времени около 8 с на каждый компонент первая ошибка (отказ) может возникнуть только через 22 часа. При автоматической сборке с временем такта 1 с на один компонент ошибка может возникнуть в среднем после 2 час. 45 мин.

Эти числовые примеры показывают какие высокие требования предъявляются к производству ПУ, выполненных по ТПМ.

В интересах создания несложных, экономичных и надежных контрольных адаптеров, а также для обеспечения надежного доступа к стороне печатного узла, на которой располагаются компоненты, с целью поиска неисправностей при контроле, к конструкции узла предъявляются следующие требования:

- в печатном рисунке необходимо предусмотреть отдельные точки для контактирования контрольных игл;

- точки контактирования должны располагаться на стороне пайки;

- точки контактирования должны располагаться с шагом 2,5 мм.

В качестве точек контактирования можно использовать паяные сквозные отверстия с диаметром не менее 1,3 мм, специальные контрольные участки с диаметром не менее 1,3 мм, при смешанном варианте монтажа компонентов, точкой контактирования может быть паяный вывод DIP-компонента.

Точки контактирования должны быть свободными от защитных покрытий и изоляции, располагаться на достаточном удалении от паяных поверхностей контактных площадок компонентов или их краев, располагаться на достаточном удалении от внешних краев, технологических и других отверстий с целью обеспечения надежного контактирования.

В этой связи следует отметить, что еще на ранних стадиях при разработке конструкции ПУ необходимо учитывать удобство контроля и устранения неисправностей, которые, в свою очередь, нуждаются в оптимизации.

4.5. Ремонт в технологии поверхностного монтажа

Одной из проблем поверхностного монтажа является ремонт или доработка печатных узлов.

Любая доработка (ремонт) сводится к разрыву функциональной цепи и прокладке новой цепи, как правило, объемным проводником с использованием дополнительной контактной площадки [8].

Для микросхем в корпусах с планарными выводами последние распаиваются на плоские контактные площадки, от которых отходят короткие печатные проводники, соединенные с металлизированными отверстиями, часть которых может располагаться под корпусом микросхем. В этом случае доступ к соединительным печатным проводникам отсутствует, и разрыв цепи после монтажа микросхемы разрезанием печатного проводника становится невозможным.

Для отсоединения проводников в смонтированных устройствах обычно производят отпайку выводов микросхемы от контактных площадок; после чего вывод приподнимается над контактной площадкой и, таким образом, цепь разрывается.

Приподнятый вывод может быть изолирован и зафиксирован клеем или пайкой к подкладываемой под вывод изолирующей контактной площадке. Но этот процесс доработки сложен, малонадежен, а для БИС с шагом выводов 0,625 мм и менее, вообще, не приемлем из-за малого расстояния между соседними контактными площадками и малой жесткости и прочности самих выводов.

Перенос всех металлизированных отверстий данной микросхемы в зону вне корпуса позволит избежать необходимости отпаивать вывод при доработке. Отходящие от контактных площадок проводники под корпус микросхемы, будут располагаться влево (вправо) сразу от площадки под некоторым углом (например, 45°). Проводник будет виден в промежутке между выводами микросхемы. И это позволит перерезать его плоским специальным резак (рис.61).

Необходимое условие: надо формировать выводы микросхемы так, чтоб между корпусом микросхемы и краем контактной площадки был достаточный размер для выполнения наклонного печатного проводника и введения специального резака.

Испытания показали, что расстояния 1,2...1,5 мм обычно выполняемого при формовке выводов достаточно. Сложнее осуществить доработку этим способом импортных микросхем, которые приходят отформованными (например, в корпусе PQFP свободное расстояние составляет 0,65 мм) [48].

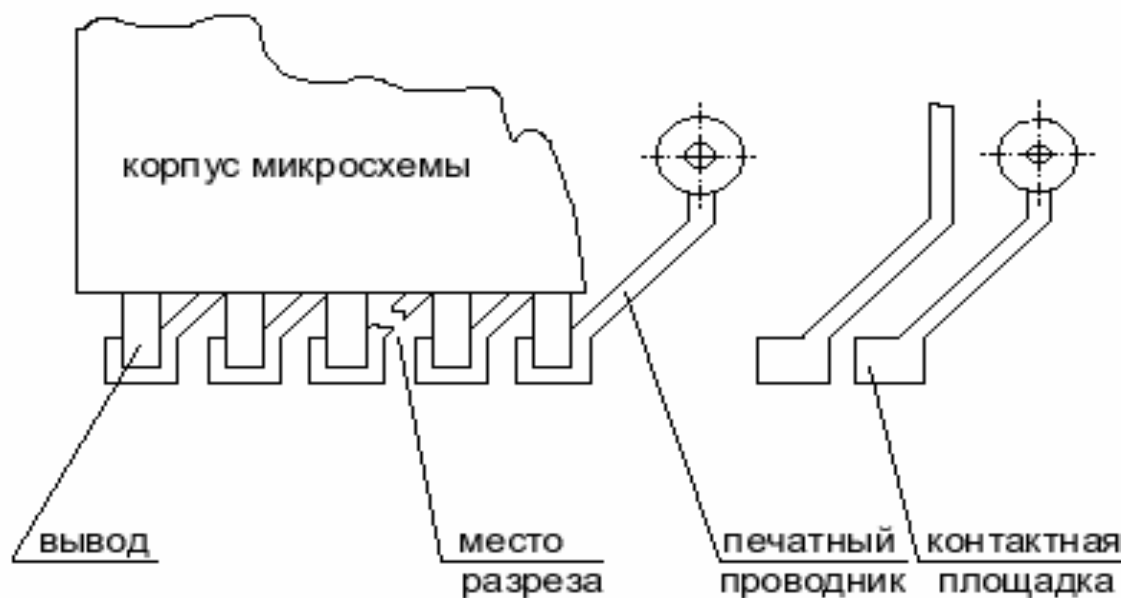


Рис.61. Вариант конструкции печатного узла для последующего ремонта

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Назовите основные показатели качества РЭС.
2. Перечислите основные методы оценки надежности мест пайки.
3. Какова основная цель визуального метода оценки качества паяных соединений?
4. Что такое профиль места пайки ?
5. Какие профили мест пайки наиболее распространены в ТПМ ?
6. Покажите влияние внешних колебаний на надежность паяного соединения.
7. Укажите какие факторы определяют профиль места пайки.
8. Какая топология знакоместа наиболее предпочтительна для простых чип-компонентов ?
9. Какие параметры участвуют в расчетной модели надежности места пайки ?
10. Какова последовательность расчета надежности профиля места пайки с позиции виброненадежности ?
11. Какова предельная величина объемного сопротивления паяного соединения компонента на ПП ?
12. Назовите факторы влияющие на изменение объемного сопротивления.
13. Как изменяется объемное сопротивление места пайки от циклической нагрузки ?
14. Что такое термоциклирование и как оно влияет на надежность изделия ?
15. Как влияет толщина нанесенной пасты на механическую прочность паяного соединения ?
16. Почему график «усилие-путь» имеет два максимума ?
17. Какова оптимальная толщина наносимой пасты для надежного паяного соединения при термоциклировании изделия ?
18. Покажите влияние температуры на качество печатного узла ?
19. Покажите на графике участки надежного функционирования изделия и появления отказа.
20. Какие требования необходимо учесть, чтобы повысить надежность места пайки ?
21. Назначение функционального контроля.
22. Какие требования предъявляются к топологии печатного рисунка при функциональном контроле ?
23. Какие условия необходимо учитывать при установке контрольной иглы на контактную площадку ?
24. Приведите формулу показателя качества пайки компонентов на печатную плату.
25. Из каких операций состоит технологический процесс сборки ПУ без и с системой управления качеством ?
26. Какие требования необходимо учитывать при конструировании ПУ ?
27. Как выполняется ремонт печатных узлов в технологии поверхностного монтажа ?
28. Какие условия необходимо соблюдать при проектировании ПП для обеспечения ремонта ?

5. ТРАФАРЕТНАЯ ПЕЧАТЬ В ТПМ

Трафаретная печать – это основной метод нанесения паяльных паст в ТПМ при крупносерийном производстве, сочетающий высокую производительность с хорошей повторяемостью и однородностью, осаждаемых на контактные площадки паст, при высокой плотности и сложности топологии рисунка. Метод трафаретной печати широко используется в течении многих лет при изготовлении гибридных ИС для нанесения толстых пленок и установки элементов на керамические подложки. Однако попытки механического переноса этой технологии на ТПМ натолкнулись на несколько проблем: 1) печатные платы имеют значительно большие размеры по сравнению с подложками гибридных ИС, что значительно ужесточает допуски как на размещение контактных площадок на платах, так и на точность позиционирования трафарета и расположение его элементов; 2) паяные соединения на плате должны обеспечивать не только электрическое контактирование, но и механическое закрепление элементов, для чего требуется большее количество припоя, а поскольку размеры контактных площадок в платах имеют близкие значения, то увеличение количества припоя возможно только за счет увеличения толщины слоя паяльной пасты, что влечёт за собой необходимость разработки новых конструкций трафаретов; 3) размеры частиц порошка припоя имеют существенное значение, что требует применения сеток с более крупными ячейками.

Как уже приводилось, одной из важнейших операций технологического процесса производства печатных узлов с применением технологии поверхностного монтажа является операция нанесения паяльной пасты через трафарет на контактные площадки печатной платы. Международный опыт свидетельствует, что 70% брака, собранных печатных узлов, обусловлено нарушениями, допущенными в процессе нанесения паяльной пасты на поверхность печатной платы, в том числе вследствие использования трафаретов низкого качества. Таким образом, одним из важнейших слагаемых успеха в производстве печатных узлов является правильно сконструированный и изготовленный трафарет, используемый для нанесения паяльной пасты.

Основные требования, предъявляемые к трафаретам:

- высокая точность размеров и размещения отверстий под контактные площадки;
- строгая вертикальность стенок отверстий;
- минимальная неровность стенок отверстий;
- правильно выбранная толщина трафарета;
- высококачественный применяемый материал.

Рассмотрим подробнее различные виды трафаретов, которые применяются в ТПМ.

5.1. Трафареты в ТПМ

При трафаретной печати применяют трафарет-элемент, состоящий из жесткой рамки, на которой натянута металлическая и неметаллическая сетка. Сетка служит несущей конструкцией для рисунка топологии контактных площадок платы, получаемого на фоточувствительной эмульсии, которая наносится на сетку и имеет определённую толщину. Толщина слоя пасты на плате определяется суммой толщин сетки и эмульсии.

Типичные значения параметров сеток для ТПМ трафаретов приведены в табл.23.

На практике наиболее часто используют два вида трафаретной печати – бесконтактный, при котором между трафаретом и плоскостью печатной платы в исходном состоянии имеется зазор (рис. 62) и контактный, когда трафарет в исходном положении лежит на печатной плате и снимается с нее после нанесения пасты (рис. 63).

Второй метод является более предпочтительным при нанесении пасты на платы большой площади, поскольку отсутствуют упругие деформации трафарета, что повышает точность топологического рисунка.

Имеются существенные особенности в конструкциях ракелей, используемых при изготовлении узлов в ТПМ. Для получения качественных отпечатков на большой поверхности при высокой повторяемости в ТПМ применяют металлические ракели ромбовидного либо прямоугольного сечения с алмазным покрытием.

Таблица 23.

Материал сетки	Число ячеек на 25мм (меш.)	Диаметр провода, мкм	Размер окна, мкм	Прозрач ность, %	Толщина плёнки, мкм
1.Полиэстер.	54	170	290	40	275
2.Нержавеющая сталь	80	100	224	47	215
3. Нержавеющая сталь	80	50	265	71	110
4. Полиэстер.	45	45	210	68	74

Примечание. Позиции 1, 2 соответствуют параметрам сеток, используемых до внедрения ТПМ; позиции 3, 4 – при внедрении ТПМ.

При нанесении пасты на контактные площадки малых геометрических размеров при выборе параметров трафарета следует учитывать три наиболее важные его характеристики: тип материала сетки, соотношение площадей открытых и закрытых участков и толщину трафарета. На практике используют два типа материалов – полиэстер и нержавеющую сталь. Полиэстер обладает высокой температурой

плавления, хорошей химической стойкостью, низким значением влагопоглощения, стабильностью размеров, малой величиной текучести под нагрузкой, высокой твёрдостью поверхности.

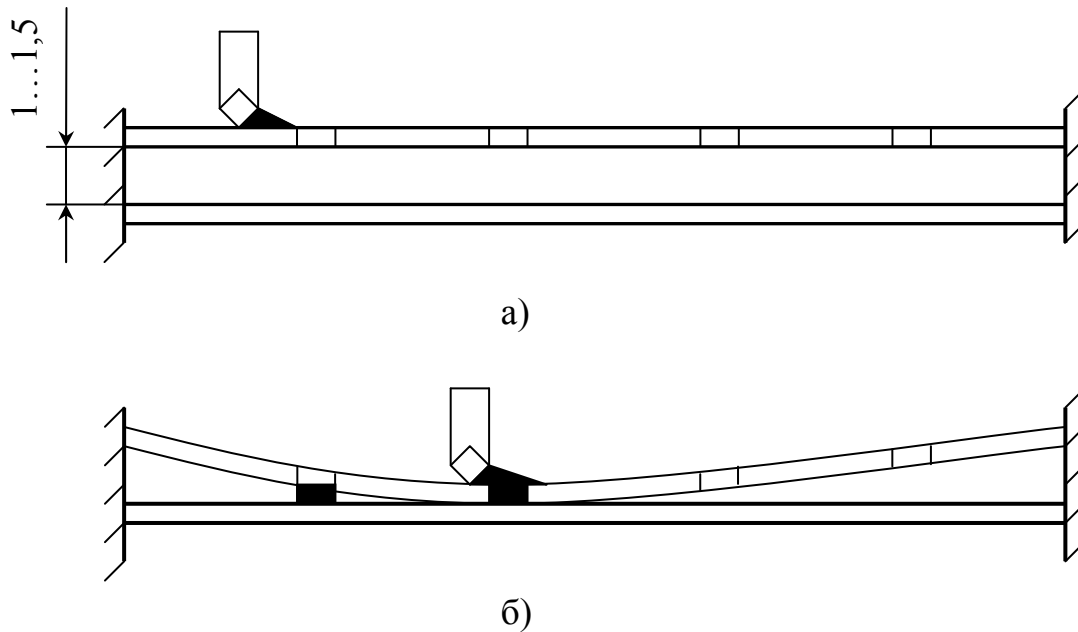


Рис. 62. Бесконтактный метод нанесения припойной пасты:
а – исходное состояние; б – при нанесении пасты.

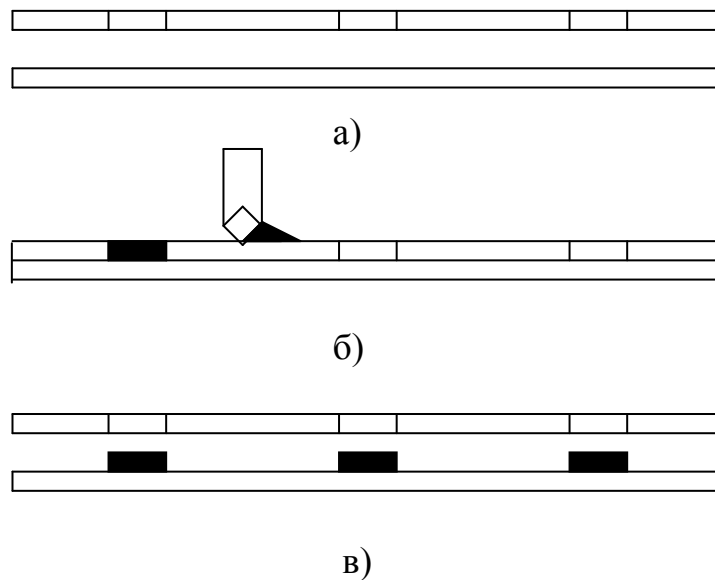


Рис. 63. Контактный метод нанесения припойной пасты:
а – исходное состояние; б – в процессе нанесения пасты;
в – после нанесения пасты.

Трафарет из полиэстера дешевле, чем из нержавеющей стали и обладает меньшей упругостью (более податлив), что важно при бесконтактном способе нанесения пасты, когда трафарет должен периодически прогибаться под действием ракеля и восстанавливать положение после его прохождения. Трафареты из нержавеющей стали, с другой стороны, выдерживают значительно более высокие значения растягивающих усилий при натяжении сетки на рамку, что весьма важно для точного нанесения пасты при больших рабочих поверхностях. Для нанесения пасты на площадки малых размеров требуется увеличивать количество ячеек сетки, что при неизменных общих размерах трафарета приводит к снижению размеров ячеек, величина которых ограничена максимальными размерами частиц порошка припоя. В большинстве используемых паст размеры частиц порошка припоя не превышают 85 мкм. Для нормальной работы трафарета размеры ячеек сетки должны иметь величину не менее чем в 3 раза превышающую это значение. Трафареты из нержавеющей стали, позволяют получать ячейки большей площади при одном и том же их количестве на единицу поверхности вследствие меньшего диаметра нитей, что обусловлено их большей механической прочностью.

Преимущество более тонких проводников из нержавеющей стали, заключается в возможности получать большее соотношение прозрачных и непрозрачных участков.

Обычное значение для стальных сеток составляет 80 ячеек на 25 мкм (80 меш.) при апертуре 225 мкм, что является компромиссом между размерами частиц порошка припоя и минимальными размерами отпечатка на контактных площадках.

Типичные параметры ТПМ трафаретов: материал – нержавеющая сталь; сетка – 80 меш., толщина сетки – 0,1 мм; прозрачность – 70,5 %; толщина эмульсии – 125 мкм; толщина осажденной пасты (влажной) – 200 мкм.

Толщину слоя пасты, нанесённого через сетчатый трафарет, можно рассчитать с помощью следующего выражения:

$$t_{\text{пс}} = t_{\text{с}} * k + t_{\text{э}},$$

где $t_{\text{пс}}$ – толщина осаждённого слоя пасты (влажной); $t_{\text{с}}$ – толщина сетки; k – коэффициент прозрачности сетки; $t_{\text{э}}$ – толщина эмульсии.

Для большинства элементов в ТПМ требуется трафарет с толщиной эмульсионного слоя в 60 мкм, однако, в ряде случаев необходимо более толстые слои пасты. Так, например, при монтаже ИС в безвыводных керамических корпусах надёжность паяного соединения возрастает с увеличением объема припоя в соединении. В другом случае, при монтаже элементов с особо тонкими выводами (которые могут оказаться не компланарными) может потребоваться увеличение дозы припоя для компенсации (заполнения) зазора между выводами и контактными площадками. В этих случаях толщина слоя пасты может достигать 1000 мкм. Получение сетчатых трафаретов с эмульсией такой толщины представляет собой сложную техническую задачу.

В этом случае применяют шаблоны – металлические трафареты с окнами, полученными двусторонним травлением (химическим фрезерованием) для

достижения лучшей вертикальности стенок (рис. 64). Шаблоны изготавливают из нержавеющей стали, латуни или бериллиевой бронзы.

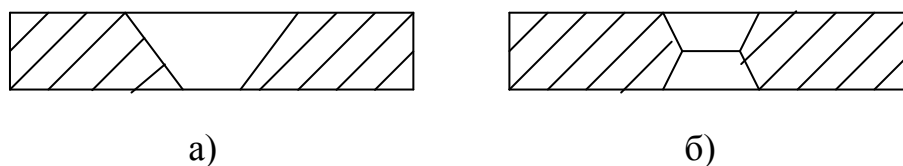


Рис.64. Окна в металлическом трафарете – шаблоне:
а – при одностороннем травлении; б – при двустороннем травлении.

Вязкость паст при печати через шаблон аналогична сеткографической печати, ближе к более вязкому краю возможного диапазона вязкостей. Шаблон имеет больший по сравнению с трафаретом срок службы.

Самого большого успеха в производстве трафаретов для поверхностного монтажа и оборудования для их производства достигли специалисты Германии. Они изготавливают металлические трафареты для поверхностного монтажа, в том числе для монтажа микросхем с малым шагом между выводами, по лазерной технологии.

Лазерная технология производства трафаретов имеет неоспоримые преимущества по сравнению с изготовлением трафаретов методом травления:

- высокая точность позиционирования рисунка трафарета;
- строгая вертикальность стенок отверстий;
- малая неровность стенок отверстий (не более 3 мкм).

Неоспоримым преимуществом данного производства является возможность передачи исходных данных по модему, кратчайшие сроки изготовления трафаретов (3-5 дней - стандарт, 1-2 дня - экспресс), исключение дополнительных операций по изготовлению фотошаблонов, необходимых при изготовлении трафаретов травлением, и, наконец, экологическая чистота технологического процесса.

При необходимости трафарет может быть закреплён на раме с помощью сетки или на раме специальной конструкции механическими прижимами.

Для изготовления трафарета необходим файл Гербер – формат. Регистрационные знаки, текст, контактные площадки и реперные знаки должны содержаться в одном файле.

Высокое качество трафаретов, изготовленных по лазерной технологии, позволит существенно уменьшить расход паяльной пасты из-за строгой вертикальности и малой неровности отверстий, повысить качество и надёжность производимой электронной аппаратуры.

Поставщиком трафаретов для поверхностного монтажа в России является АО предприятие ОСТЕК

Для сочетания преимуществ сетчатых трафаретов и шаблонов применяют их комбинацию, скрепляя эти два типа трафаретов по периметру. Такой комбинированный трафарет имеет приемлемую гибкость (эластичность) и может

использоваться для безконтактного нанесения пасты. Толщину пасты задают подбором толщины сетки и шаблона. В отдельных применениях сетку удаляют из окон трафарета, что позволяет получать топологию особо малых размеров. Наличие в окнах металлического шаблона сетки позволяет осаждать пасту на контактные площадки островного типа [23].

Также трафареты изготавливаются из хромо-никелевого сплава, имеющего длительный срок службы, не оказывающего никакого влияния на последующий процесс пайки и, как показала практика, являющегося лучшим выбором по сравнению с другими материалами, например, никель-серебро. Толщина трафарета может быть выбрана из следующего ряда: 50, 100, 150, 200 или 250 мкм. Максимальный размер трафарета может составлять 600×500 мм при рабочей области 420×380 мм либо 800×600 мм при рабочей области 600×500 мм. Возможно изготовление трафарета для мультипликационной платы [31].

АО САМ Москвы – предприятие, обладающее производством высокоточных шаблонов для трафаретной печати.

Шаблон имеет следующие технические параметры:

- размер рамки 530×680 мм;
- размер металлического шаблона 400×500 мм;
- размер рабочей зоны шаблона 300×400 мм;
- толщина металлического шаблона 0,15 – 0,2 мм;
- шаг металлической сетки 0,22 мм;
- толщина проволоки 0,2 мм.

Технология изготовления сетчатых рам содержит следующие операции:

- натяжение обрезанной в размер на установке KGV фирмы Hezinger сетки на металлическую рамку на натяжном столе СН 8962 с УФ – лучами DFS100;
- приклеивание натянутой сетки к рамке двухкомпонентным импортным клеем;
- просушка после приклеивания УФ – лучами;
- наклеивание вырезанной металлической фольги на натянутую сетку;
- вырезание сетки по размеру приклеенного шаблона.

Изготовление шаблонов выполняется по следующей последовательности:

- изготовление шаблона методом прожига фольги на лазерной установке НААС – LAZER фирмы RITTAL;
- обработка шаблона на зачистной установке с модулем мойки BURST871;
- промывка и сушка;
- обработка шаблона кварцевым песком на струйной установке типа 100S фирмы SAND MASTER;
- промывка и сушка шаблона.

Для производства радиоэлектронной аппаратуры новых поколений с высоким уровнем надёжности и уменьшенными массогабаритами характеристиками ОАО ЦНИТИ «Техномаш» проводит работы по созданию оборудования и материалов для реализации технологии поверхностного монтажа, серийно выпускает СТО (специальное технологическое оборудование) для сборки печатных узлов с использованием поверхностно-монтируемых изделий электронной техники (ПМ ИЭТ).

Для различных объёмов установки ИЭТ разработаны и изготавливаются следующие виды СТО, отличающиеся степенью автоматизации процесса сборки:

- для мелкосерийного производства печатных узлов, в том числе для изготовления макетов и опытных образцов радиоэлектронной аппаратуры, выпускается комплект технологической оснастки «Трасса – 4300» - набор приспособления и инструмента для оснащения рабочих мест монтажника;

- для серийного производства печатных узлов РЭА предназначен автомат установки ПМ ИЭТ «Трасса – 4102», позволяющий автоматизировать операции нанесения клея или паяльной пасты и установку элементов: SOD, MELF, CHIP, SOT – 23, SOT – 89, SO, SOT – 143 и др. [49].

Обязательной операцией при трафаретной печати является чистка шаблонов. Здесь необходимо заметить, что кисти и щетки, какими бы мягкими они не были, абсолютно непригодны для чистки шаблонов. Для этой операции необходимо применять чистящие средства, например ацетон и мягкую, хорошо впитывающую влагу бумагу, не имеющую волокнистой структуры. Очень хорошо зарекомендовала себя рулонная бытовая бумага.

В случае необходимости общей очистки трафарета рекомендуется выполнить следующие действия:

- расстелить бумагу в два слоя на плоской поверхности приблизительно в соответствии с размером трафарета;
- уложить трафарет на бумагу таким образом, чтобы сторона с нанесенным слоем пасты была обращена вниз;
- смочить бумагу чистящим средством и оросить трафарет. Не рекомендуется тереть шаблон, т.к. остатки флюса должны смываться, а не удаляться посредством протирания;
- процесс повторять каждый раз с использованием новой бумажной основы до тех пор, пока не будет удалена вся паста.

Оптимальная чистка может быть осуществлена только с помощью специальной установки для чистки сетки шаблона, в которой чистящее средство распыляется под давлением.

5.2. Оборудование для трафаретной печати

Устройство трафаретной печати ТР-903

Достоинства устройства:

- быстрая смена шаблонов при переходе на новую плату;
- прецизионная настройка с помощью микровинтов по двум осям и углу;
- возможность подключения вакуума;
- низкая стоимость шаблонов;
- износостойкий ракель с четырьмя рабочими кромками;
- подставка для ракеля;

Устройство ТР-903 предназначено для ручного нанесения клея или паяльной пасты на печатные платы методом трафаретной печати в производстве электронной

аппаратуры по технологии поверхностного монтажа. Имеются две модели устройства: TP-903.001 и TP-903.002 различающиеся величиной рабочего поля.

Устройство работает с металлическими шаблонами, изготавливаемыми из латуни, бронзы или нержавеющей стали, и имеет простую и удобную конструкцию, позволяющую легко закреплять и сменять их.

Компактное устройство TP-903 настольного типа по заказу может комплектоваться вакуумным насосом для прижатия печатной платы к поверхности рабочего столика, что уменьшает неплоскостность при использовании гибких печатных плат с короблением.

Совмещение рисунка трафарета и печатной платы производится микрометрической регулировкой положения печатной платы отдельно по двум осям и углу её ориентации на рабочем столике.

Удачная, простая, эргономичная конструкция, обеспечивающая высокое качество нанесения материалов, сделали устройство TP-903 одним из самых популярных для трафаретной печати при использовании технологии поверхностного монтажа в мелкосерийном производстве.

Технические характеристики на данные устройства приведены в табл.24

Таблица 24

Модель	Технические характеристики		
	Величина рабочего поля, мм	Габариты, Мм	Вес, Кг
TP – 903.001	160×100	430×170×100	5,5
TP – 903.002	360×235	650×325×90	15

Полуавтомат трафаретной печати Print it

Возможности оборудования:

- точное нанесение паяльной пасты и других материалов;
- микропроцессорное управление;
- семь типовых рабочих программ в памяти;
- гибкая система отладки техпроцесса.

Полуавтомат Print it предназначен для нанесения на поверхность печатных плат паяльной пасты, клея или других вязких материалов методом трафаретной печати.

Высокое качество нанесения паяльной пасты на печатные платы при выполнении одной из наиболее ответственных операций технологического процесса делают автомат Print it незаменимым в условиях серийного производства электронной аппаратуры.

Полуавтомат позволяет добиться высокой повторяемости нанесения материала и уменьшить влияние человеческого фактора на процесс производства, что способствует высоким результатам при пайке печатных узлов и, следовательно,

повышает качество и надёжность аппаратуры, уменьшает затраты на исправление дефектов пайки.

Технические характеристики полуавтомата Print it приведены в табл.25

Полуавтомат Print it позволяет быстро перезагружать печатную плату, имеет автоматическую подачу паяльной пасты в ракель.

По желанию пользователя нанесение паяльной пасты может производиться за один или два прохода ракеля.

Возможно применение любых трафаретов: металлических, сетчатых и др.

Полуавтоматы Print it имеет микропроцессорное управление, содержит в памяти семь типовых программ, способствующих быстрой настройке и отладке техпроцесса.

Полуавтомат трафаретной печати SP-20

Возможности оборудования:

- высокая точность нанесения паяльной пасты, в том числе для ИМС с малым шагом выводом;
- точное микрометрическое совмещение трафарета с рисунком печатной платы;
- возможности подключения вакуума.

Полуавтомат SP-20 предназначен для нанесения паяльной пасты на печатные платы методом трафаретной печати в производстве электронной аппаратуры по технологии поверхностного монтажа в полуавтоматизированном режиме.

Таблица 25

Рабочее поле, мм	350×240
Габариты печатной рамки, мм	530×430×30 (430×330×30)
Размер ракеля, мм	250 (200)
Объём загружаемой паяльной пасты (два патрона), см ³	2×30
Скорость движения ракеля в каждом направлении, см/с	0,6-0,3
Диапазон регулирования времени дозировки пасты, с	0-12
Ёмкость памяти, программ	7
Напряжение питания, В	~220
Потребляемая электрическая мощность, ВА	40
Пневмопитание: давление сжатого воздуха max, кгс/м ²	7
Потребление воздуха (при давлении 6 кг/см ²), л/цикл	4
Габаритные размеры, мм	135×520×415
Вес, кг	60

Технические характеристики полуавтомата SP-20 приведены в табл.26

Таблица 26

Рабочее поле max, мм	406×356
Габариты печатной платы max, мм	419×419
Габариты рамки трафарета, мм	508×508
Диапазон ХУ/А регулировки трафарета, мм/град	±12, 7/±5
Повторяемость совмещения трафарета С рисунком печатной платы, мкм	±13
Длина держателя ракеля, мм	254, 356, 419
Ширина ракеля, мм	9,5
Ход ракеля max, мм	406
Диапазон регулирования скорости ракеля, мм/сек	38-152
Напряжение питания, В	~220
Потребляемый ток max, А	5,5
Пневмопитание: давление сжатого воздуха, кг/см ²	5,5-8,5
Расход воздуха, л/сек	1
Габаритные размеры (без станины), мм	724×1016×483
Вес (без станины), кг	473

Полуавтомат работает с металлическими шаблонами и имеет простую и удобную конструкцию, позволяющую легко закреплять и сменять их. Загрузка и выгрузка печатной платы производится вручную. Для фиксации и точной установки печатной платы на рабочем столе используются универсальные штыри.

Совмещение трафарета с рисунком печатной платы производится микрометрической регулировкой положения стола отдельно по двум осям и углу. Механизм регулировки снабжён независимой блокировкой по каждой координате.

Для управления перемещением ракеля используется педаль. Величина давления ракеля на трафарет при нанесении пасты контролируется по циферблатному индикатору.

Полуавтомат трафаретной печати SP-20 настольного типа по заказу может комплектоваться станиной и вакуумной системой для прижатия печатной платы к поверхности рабочего стола, что уменьшает неплоскостность при использовании гибких печатных плат и печатных плат с короблением, надёжно удерживая плату на столе.

Полуавтомат трафаретной печати SPM

Возможности оборудования:

- высокая точность нанесения паяльной пасты, в том числе для микросхем с малым шагом между выводами;

- точное автоматическое или ручное совмещение трафарета с рисунком печатной платы;

- микропроцессорная система управления.

Полуавтомат SPM предназначен для нанесения паяльной пасты на печатные платы методом трафаретной печати в производстве электронной аппаратуры по технологии поверхностного монтажа в полуавтоматизированном режиме.

Полуавтомат имеет встроенную микропроцессорную систему управления. Все рабочие параметры отображаются на экране дисплея.

Совмещение трафарета с рисунком печатной платы может производиться автоматически или вручную микрометрической регулировкой положения подплатника отдельно по двум осям и углу. Система регулировки снабжена системой технического зрения с монитором.

Установка печатной платы на подплатник производится вручную. После автоматической (или ручной) коррекции положения печатной платы на подплатнике, последний автоматически перемещается в зону нанесения паяльной пасты, после чего возвращается назад для ручной разгрузки печатной платы.

Полуавтомат работает с металлическими шаблонами.

По заказу полуавтомат трафаретной печати SPM может комплектоваться системой очистки нижней стороны шаблона с применением растворителя.

Технические характеристики полуавтомата SPM приведены в табл.27

Таблица 27

Рабочее поле max, мм	508×432
Габариты печатной платы min/max, мм	76×51/521×470
Габариты рамки трафарета max, мм	635×584
Диапазон XY/A регулировки трафарета, мм/град	±12,7/±5
Повторяемость совмещения трафарета с рисунком печатной платы, мкм	±12,5
Длина ракеля max, мм	521
Ход ракеля max, мм	457
Диапазон регулирования скорости ракеля, мм/сек	9,5-127
Диапазон регулирования давления ракеля, кг	0-23
Напряжение питания, В	~220
Потребляемая мощность, кВт	1
Пневмопитание: давление сжатого воздуха, кг/см ²	5,5-8,5
Расход воздуха, л/сек	1,5
Габаритные размеры, мм	1829×1143×1321 ⁺⁷⁶
Вес, кг	3740

Автомат трафаретной печати Ultraprint 2000

Возможности оборудования:

- высокая точность нанесения паяльной пасты, в том числе для ИМС с малым шагом;
- автоматическая загрузка/выгрузка печатных плат;
- автоматическое совмещение трафарета с рисунком печатной платы;
- 2-х или 3-х мерный оптический контроль нанесённой паяльной пасты;
- память на 200 рабочих программ;
- компьютерное управление;
- возможность нанесения клея.

Автомат Ultraprint 2000 предназначен для автоматического нанесения на поверхность печатных плат паяльной пасты методом трафаретной печати в условиях серийного и крупносерийного производства.

Автомат работает под управлением компьютера и обеспечивает загрузку печатных плат, совмещение трафарета с рисунком печатной платы, нанесение паяльной пасты на печатные платы, контроль нанесённой паяльной пасты и выгрузку печатных плат. Двойной ракель с программно регулируемым давлением, величиной и скоростью перемещения обеспечивает оптимальное качество трафаретной печати.

Для высокоточного совмещения трафарета с рисунком печатной платы используется система технического зрения, одновременно считывающая реперные знаки с верхней стороны печатной платы и нижней стороны трафарета.

Система очистки трафарета (поставляется по заказу) осуществляет периодическую сухую или с применением растворителя чистку нижней поверхности трафарета с использованием специальной чистящей бумаги. Система автоматической подачи паяльной пасты (поставляется по заказу) наносит её на трафарет с периодичностью, в количестве и с профилем распределения вдоль ракеля, задаваемыми программно. Это позволяет сократить потери пасты.

Транспортная система автомата соответствует стандарту SMEMA и позволяет работать с печатными платами, имеющими поверхностный монтаж с нижней стороны (высота компонентов не должна превышать 12,7 мм). Ширина свободных кромок печатной платы, используемых транспортной системой автомата, должна составлять 5 мм. Толщина печатной платы может варьироваться в пределах от 0,35 до 12,7 мм. Ширина транспортёра регулируется вручную или автоматически (по заказу). Поставляемые по заказу системы 2-х или 3-х мерного контроля осуществляет автоматический оптический контроль нанесённой пасты по площади или объёму соответственно с одновременным отображением хода проверки на экране монитора.

Автомат Ultraprint 2000 позволяет добиться высокой повторяемости нанесения паяльной пасты и уменьшить влияние человеческого фактора на процесс производства, что способствует высоким результатам при пайке печатных узлов и, следовательно, повышает качество и надёжность аппаратуры, уменьшает затраты на исправление дефектов пайки.

Технические характеристики автомата Ultraprint 2000 приведены в табл.28

Таблица 28

Рабочее поле min/max, мм	50,8×50,8/508×406,4
Габариты печатной платы min/max, мм	50,8×50,8/508×406,4
Габариты рамки трафарета max, мм	736,6×736,6
Диапазон ХУ/А регулировки трафарета, мм/град	±12,7/±3
Точность совмещения трафарета с рисунком печатной платы, мкм	±25,4
Повторяемость совмещения трафарета С рисунком печатной платы, мкм	±13
Длина ракеля max, мм	483
Ход ракеля max, мм	475
Диапазон регулирования скорости ракеля, мм/сек	6,35-127
Диапазон регулирования давления ракеля, кг	0,453-23±2%
Ёмкость картриджа с паяльной пастой, см ³	72,5/174/348
Ход дозатора max, мм	457
Напряжение питания, В	~220
Потребляемый ток max, А	20
Пневмопитание: давление сжатого воздуха, кг/см ²	5,6-8,8
Расход воздуха, м ³ /мин	0,12
Габаритные размеры, мм	1169×1626×1372×178
Длина конвейера стандарт/заказ, мм	1295/1677
Вес, кг	677

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Виды трафаретной печати
2. Как получить качественный топологический рисунок при использовании сетчатого трафарета ?
3. Чем руководствуются при выборе параметров трафарета ?
4. Дать сравнительную оценку трафаретам из полиэстера и нержавеющей стали.
5. Каким образом определяется толщина слоя пасты ?
6. Каким материалам отдают предпочтение при изготовлении шаблонов ?
7. Преимущества комбинированных трафаретов.
8. Основные технические параметры шаблонов.
9. Требования, предъявляемые к трафаретам.
10. Достижения лазерной технологии в производстве трафаретов.
11. Возможности и сравнительные характеристики различных автоматов для трафаретной печати.

6. ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА

6.1. Конструирование электронных изделий в 3D виде

Основная цель современного производства – это конкурентноспособность, которую можно обеспечить только за счет сокращения длительности основных этапов жизненного цикла изделия и повышения качества продукции, удовлетворяющей все возрастающие запросы потребителя (рынка). Одним из таких этапов является этап технической подготовки производства, на котором решаются следующие задачи: проектирование, технологическая подготовка производства, анализ создаваемого изделия требованиям эксплуатации. От того на сколько качественно и быстро будет выполнен этот этап, на столько быстро будет запущено в производство изделие и на столько быстро оно появится на рынке.

Качество изделия зависит не только от того как оно спроектировано, но и от того по какой технологии изготовлено, и соответствует ли оно требованиям эксплуатации (рынка). Следовательно необходимо осуществлять процесс проектирования вместе с технологией и эксплуатацией в тех условиях, в которых будет функционировать готовое изделие, другими словами необходим интегрированный подход при проектировании качественного продукта.

В настоящее время для проектирования электронных средств всё большее место находит трехмерное, качественное конструирование, как новый этап в компьютерной технологии. Как показывают исследования [1], за последнее десятилетие в развитых странах компьютерное проектирование практически полностью вытеснило традиционное черчение, благо САПР как инструменты стали доступны практически любому предприятию. По результатам анализа Mechanical Engineering, к 1998 г. в США 96% проектировщиков использовали САПР.

Несмотря на появление в последнее время доступных и удобных систем 3D-моделирования, большинство предприятий по-прежнему основывают свой процесс проектирования на 2D технологиях. Опрос Computer-Aided Engineering показал, что сегодня более 60% работ приходится на 2D САПР. Однако, известно, что фирмы ведут активный поиск более эффективных решений и всё чаще отдают предпочтение 3D-системам.

Какие же ограничения имеются у систем 2D ? Исследования Dataquest показали следующее:

1. Для треть опрошенных специалистов основной причиной явилось то, что 2D системы вполне адекватно соответствуют решаемым задачам.
2. Процесс проектирования для типичного изделия, как правило, начинается с концептуальной схемы, которая определяет общий состав изделия и взаимное расположение деталей (качественное проектирование). Выраженная в 2D чертеже, такая конструкция далеко не всегда удобна для выявления основных противоречий концепции, особенно на наименее затратном этапе, этапе структурного проектирования. 2D-изображение является вполне достаточным для получения общего представления о деталях и сборке в целом, однако

практически бесполезно для полноценного представления о трехмерных взаимосвязях и функционировании компонентов.

3. Проектирование в 2D усложняет и увеличивает по времени процесс проверки, из-за ограничений сборочных чертежей в этом виде. Проверка многократно усложняется, если чертежи создаются различными конструкторами, часто пользующиеся своими соображениями по размерам и базам. Циклический процесс «доработка – проверка – возврат - доработка» может длиться очень долго, особенно при проектировании изделия из сотен и тысяч деталей.

4. 2D-проекты рано или поздно потребуют физических прототипов. Поскольку двумерные чертежи не позволяют полностью представить себе взаимодействие деталей в реальной трехмерной сборке, проектировщики вынуждены изготавливать физические прототипы, выполнять макетирование, чтобы выявить возможные пересечения тел, взаимное их влияние друг на друга. Помимо того, что изготовление таких макетов серьезно удлиняет процесс проектирования, устранение выявленных недостатков также требует дополнительных затрат, а зачастую и повторной работы.

5. Процесс проектирования в 2D виде подразумевает, что и детали, и сборочные единицы, в конечном итоге, должны быть представлены в виде чертежей. Конструктору следует создавать правильно оформленный чертеж с необходимым набором видов. В двумерной системе ему приходится работать с классическим набором элементов – линиями, дугами, размерами и т.д. Но такие элементы не удобны, поскольку заставляют проектировщика мыслить в терминах черчения на низком уровне, вместо того чтобы оперировать конструкторскими понятиями. К примеру, для отображения отверстия в корпусе конструктор должен мысленно перевести его в соответствующие окружности, линии и дуги, которые необходимо построить на различных видах.

Кроме того, 2D-системы абсолютно неэффективны при создании изометрии и видов разборки или развертки, когда реальные размеры деталей не соответствуют плоскому представлению на чертеже. Сложность и трудоёмкость построения изометрических изображений заставляют многие предприятия вообще отказаться от таких изображений, хотя они могут принести большую пользу в понимании проекта. Аналогичная проблема возникает, когда конструктор должен в мельчайших подробностях отобразить все элементы проектируемого изделия на различных видах, особенно если поверхность имеет сложную форму.

6. Обычно для полноты информации на чертеже или нескольких чертежах находится несколько различных видов одного и того же объекта сборки. Если происходит какое – либо изменение в изделии, его необходимо отразить на каждом виде отдельно. Хорошо, если, имеющаяся в распоряжении конструктора, система обладает параметрическими возможностями, что явно упрощает процесс, и позволяет связать виды между собой. Но, к сожалению, большинство современных 2D-систем лишены этой важной функции.

7. Двухмерные данные, как правило, почти бесполезны для программ инженерного анализа (CAE-систем), занимающиеся расчетом прочности,

теплопроводности, вибропрочности и т.п., если необходимо получить, действительно, адекватную картину протекания различных процессов в изделии. Поэтому на основе полученных двухмерных чертежей приходится создавать трехмерные данные. Очевидно, что в этом случае процесс оптимизации параметров изделия существенно затруднен, тогда проектировщик вообще отказывается от него в пользу проектов с заведомо «проходными» параметрами.

8. Для изготовления изделия по 2D-чертежу требуется дополнительное время на правильную интерпретацию и понимание изделия. Часто при этом проводится дополнительная коррекция, например из-за отсутствия некоторого размера. Соответственно и удлиняется время постановки изделия на производство. Кроме того невозможно использовать новейшие технологии, к примеру, такие, как стереолитография. Эти технологии требуют на входе 3D твердотельные модели деталей. Конечно, эту информацию можно сформировать на основе двухмерного чертежа, но опять-таки на это потребуется время и материальные затраты.

Рассмотрим какие же преимущества несет в себе 3D-моделирование.

1. Быстрое построение концептуального проекта, что предполагает удобный и интуитивный метод создания проекта.

2. Быстрое получение конструкторской документации, поскольку 3D-моделирование позволяет избавиться от необходимости рутинного создания различных видов изделия посредством 2D-элементов.

3. Наглядное представление изделия. Безусловно 3D модель является гораздо более наглядной и проектировщик и заказчик могут на этой модели адекватно оценить изделие, проверить расположение деталей в сборочной конструкции.

4. Более наглядное и точное представление изделия позволяет существенно сократить количество ошибок. Это, в свою очередь, не только повышает качество проекта, но и позволяет сэкономить время, затрачиваемое на исправление ошибок и изготовление макета.

5. 3D модель позволяет подробно рассмотреть деталь со всех сторон, проанализировать её участие в сборке. Более того, деталь может быть непосредственно спроектирована в контексте сборочной модели (проектирование по месту). При необходимости можно провести анализ работоспособности модели, рассчитать стоимость ее изготовления и т.п. Все это делает фактически ненужным изготовление проектного физического прототипа (макета) или, по крайней мере, позволяет отложить его до финальной стадии проектирования, а часто – до момента изготовления реального изделия.

6. Быстро и без потери качества выполнить изменение модели за счет средств параметризации. Возможность быстрого создания различных вариантов изделия позволяет провести больше аналитических расчетов с естественным повышением качества конечного результата.

Из приведенного анализа можно сделать вывод, что постепенно 2D-технология будет уступать своё место более эффективным и производительным инструментам - 3D моделированию.

6.2. Формализованное описание конструкции

На этапе технологической подготовки производства изделий изготовленных по ТПМ, главной задачей является разработка технологического процесса (ТП) сборки. Основу процесса автоматизированного проектирования ТП сборки и монтажа изделий составляет морфологическое описание объекта сборки, состоящего из множества взаимосвязанных элементов конструкции (например, компонентов и основания печатной платы для печатного узла) и выступающего в качестве единого целого.

Такое формализованное описание структуры и конструкторско-технологических параметров изделия является адекватным отображением сборочного чертежа и обеспечивает разработку ТП сборки и монтажа.

Прежде чем решать эту задачу необходимо произвести формализованное описание элементов конструкции изделия по ТПМ при рассмотрении их как элементов сборки. Данное формализованное описание вида, характера и многообразия взаимосвязей, возникающих между элементами конструкции при сборке, формализованное описание структуры некоторых типовых конструктивно-технологических решений сборки как декомпозиционные подмножества элементов конструкции изделия в базе данных системы автоматизированного проектирования, являются основой для разработки технологического процесса сборки.

Определение 1. Под элементом конструкции при сборке понимается, неделимая на части без воздействия разрушающего усилия, материальная деталь (электрорадиоэлемент, коммутационное основание - печатная плата) или сборочная единица (например, печатный узел), имеющая известное функциональное назначение, конкретную область применения и обладающая качественными и количественными свойствами.

Формализованное описание элемента конструкции заключается в представлении его формы и размеров с помощью вычислительных методов, лучше всего, как представлено выше, в 3D виде. Среди существующих методов геометрического описания остановимся на следующих [32]:

1. Метод описания границ.
2. Метод конструктивной геометрии.

Метод описания границ относится к одному из самых распространенных методов. В нем поверхность объекта представляется совокупностью вершин и ребер. Объем объекта моделируется путем разделения поверхностной границы на конечное количество замкнутых элементов, называемых образующими поверхностями, каждая из которых, как уже отмечалось, может быть представлена перечнем вершин и ребер.

Этот метод позволяет представить топологические и метрические сведения об объекте в виде графа, причем это представление осуществляется строго раздельно. На рис. 65 и 66 представлена структура данных для 3D объекта.

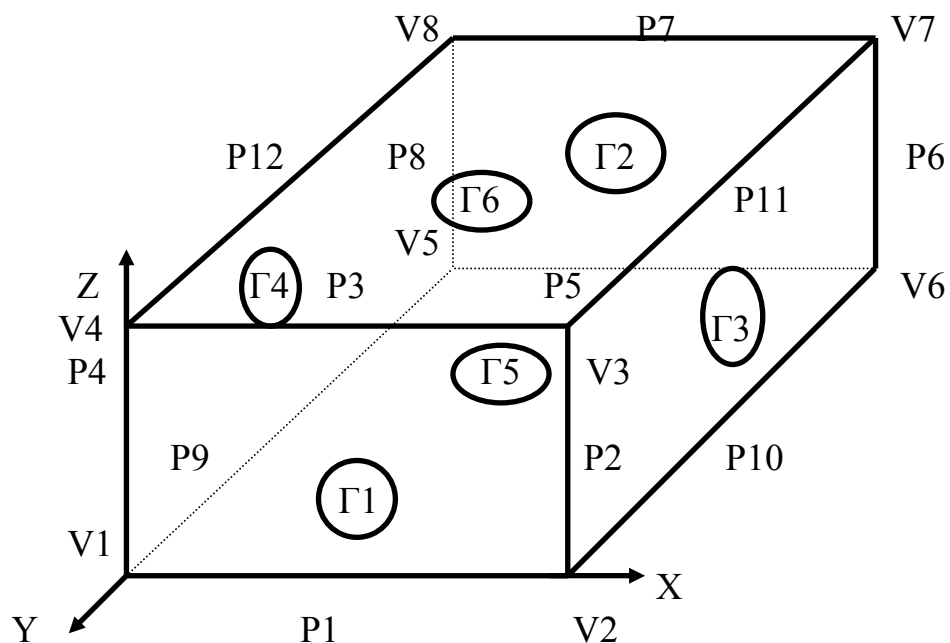


Рис. 65. Конструкция 3D объекта

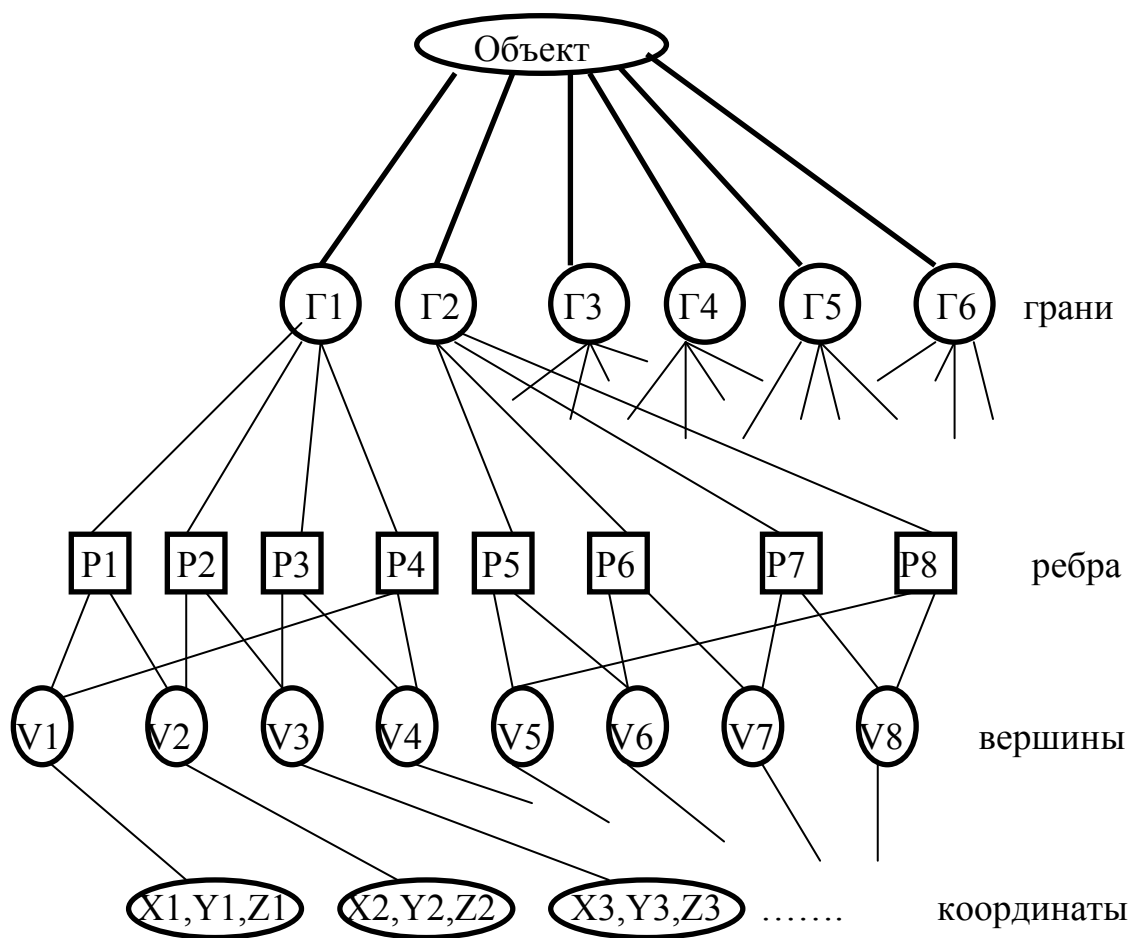


Рис. 66. Граф описания объекта в 3D виде

Такой способ описания границ объекта имеет следующие особенности:

1. Он применим как к связным объектам, так и к раздельным. В качестве примера таких объектов может служить отверстие, ограниченное серией ребер или граней (рис.67).

2. В том случае, когда объекты имеют криволинейные грани или левые образующие поверхности, 2D представление многоугольника и 3D представление многогранника только на основе сегментов линейных и плоских образующих поверхностей (граней) оказывается недостаточным (рис. 68).

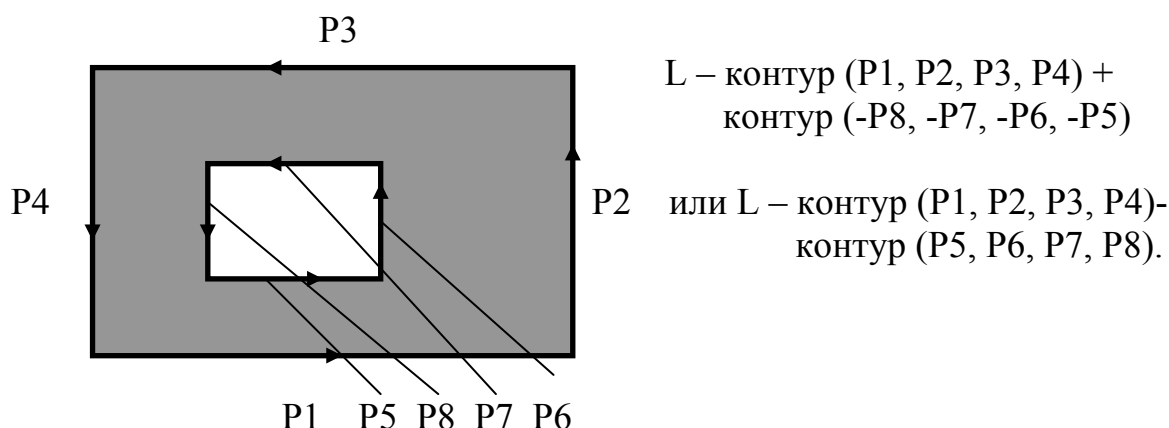


Рис. 67. Схема формирования отверстия

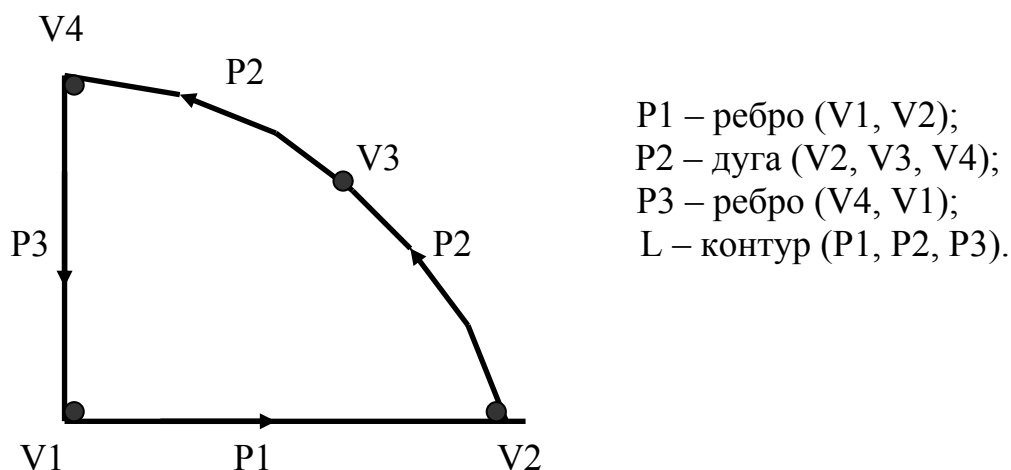


Рис. 68. Схема объекта с криволинейными ребрами

В этом случае необходимы дополнительные сведения о типе и характерных параметрах граней и ребер. При этом цифровые модели кривых линий и образующих поверхностей могут быть математическими (прямой,

окружностью, плоскостью, конусом), кривыми и поверхностями Безье, полиномиальными интерполяциями, интерполяциями Куиса (согласованием касательных).

3. С целью повышения эффективности применения некоторых алгоритмов обработки минимальную структуру можно расширить различными дополнительными данными (например, отношением смежности между образующими поверхностями, ребрами и т.д.).

4. Он требует больших объемов памяти и, кроме того, организации чрезвычайно-эффективного интерактивного механизма ввода большого количества данных.

5. Очень удобен для графического представления объектов и их взаимосвязей, поскольку алгоритм идентификации точек и линий в этом случае позволяет легко обрабатывать их на экране.

Метод конструктивной геометрии, известный ещё под названием Constructive Solid Geometry (CSG). Согласно этому методу, объекты формируются с помощью операторов объединения, пересечения, приращения, геометрических преобразований, а также базовых примитивов для плоскости (многоугольника, окружности, эллипса и т.д.) и для 3D пространства (параллелепипеда, сферы, конуса, пирамиды, цилиндра и т.д.), и представлены на рис.69

В этом методе результирующая структура данных чаще всего представляет собой двоичное дерево, ветвями которого являются базисные элементы или аргументы геометрического преобразования, а узлами – операторы, определенные заранее. На рис. 70 представлено конструктивное дерево двумерного объекта, полученное с помощью базисных элементов A1 и A2 и операторов объединения и горизонтального перемещения.

Метод конструктивной геометрии имеет свои особенности:

1. Если базисные элементы полностью соответствуют типам моделируемых объектов, то объемы входной информации невелики.

2. Этот метод позволяет представлять объекты на более высоком по сравнению с методом описания границ уровне, поскольку с его помощью можно передавать информацию о «функциональном» назначении объекта. В этом смысле он приближается к образу мыслей разработчика (проектировщика, конструктора). Кроме того, он позволяет в описание объекта легко вносить возможные изменения, если структурное дерево требует «перестройки».

3. Недостаток метода заключается в необходимости предварительной оценки возможности индикации, без чего, невозможно графическое представление моделируемого объекта. Это требует использования сложных алгоритмов представления объекта или хранения заранее созданного представления, более пригодного для индикации.

Если сопоставить преимущества и недостатки двух описанных выше методов, то становится очевидным, что они прекрасно дополняют друг друга. Это наводит на мысль о гибридном представлении, когда для интерактивной графики используется главная структура, полученная пользователем методом конструктивной геометрии или методом описания границ.

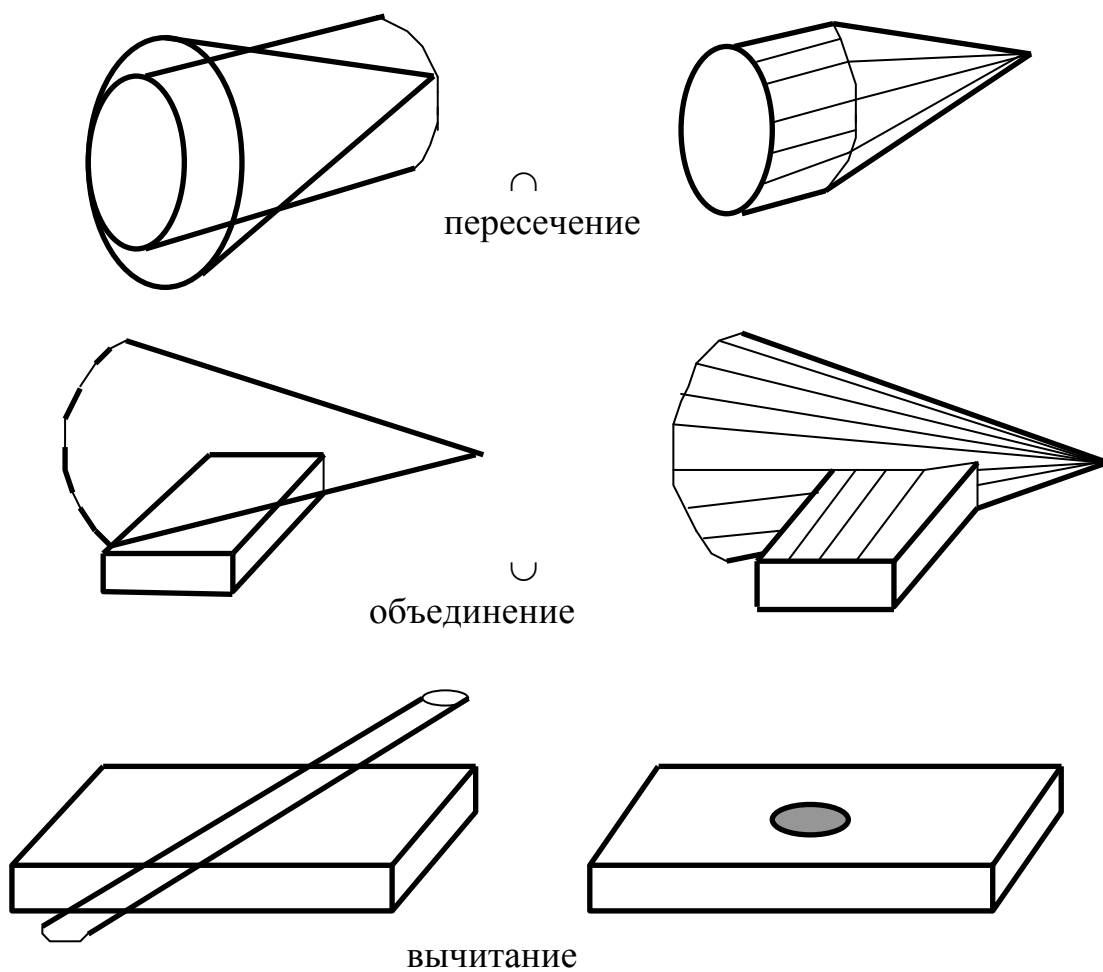


Рис. 69. Булевы операции

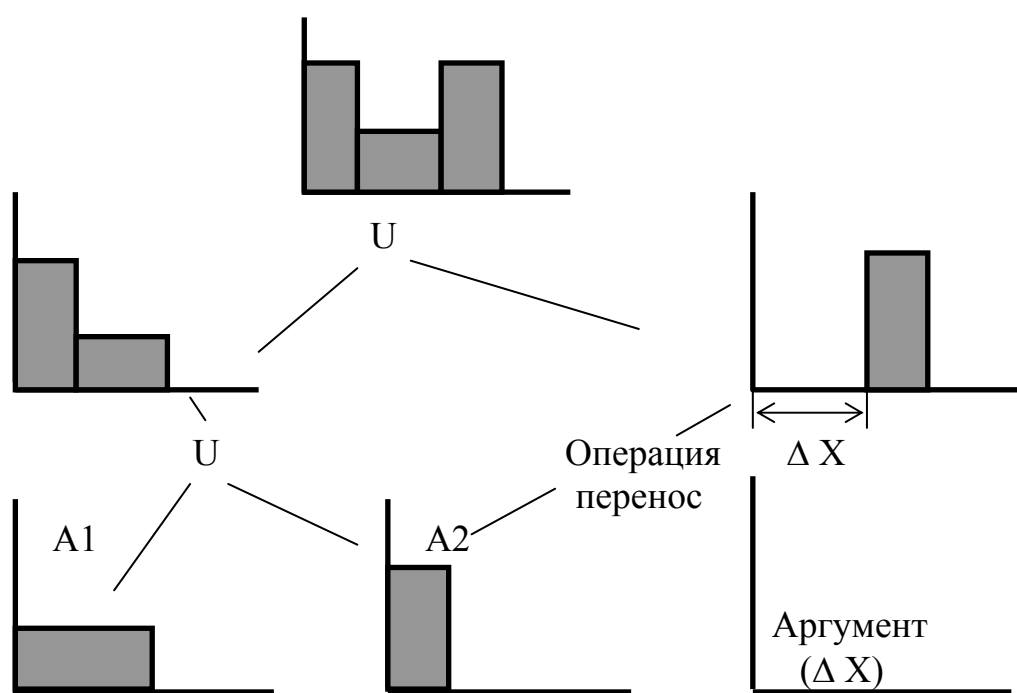


Рис. 70. Пример представления 2D объекта

Пример представления простой 2D структуры. Для описания используем метод описания границ. Напомним, что он позволяет описывать объект, границами которого являются отрезки прямой или дуги окружности.

Такая структура включает следующие элементы:

- Граница : имя границы;
- Область : имя области;
- Точка : координаты X,Y;
- Грань : тип;
- Координаты точек (2-точки, если тип ребра – отрезок прямой), (3-точки, если тип ребра – дуга окружности);
- Координаты границы;
- Поверхность: число контуров.

Удобно описывать внешний контур, используя аппарат прямых тригонометрических функций, а внутренний контур (отверстие), используя аппарат обратных тригонометрических функций. На рис. 71 представлена 3D зона, состоящая из двух областей (знакоместо компонента и печатная плата), расположенных в третьей области (воздух). Эта структура позволяет автономно рассматривать метрические данные (координаты точек) и топологические данные: список точек, характеризующих ребра; список граней, характеризующих ориентированные контуры поверхностей; формирование границ из граней; формирование областей из поверхностей.

Все это облегчает выполнение геометрических преобразований, не затрагивающих топологию. Например, для увеличения ширины поверхности припойной площадки знакоместа S_2 (рис. 71) достаточно изменить координаты точек V_{10} и V_{11} . При этом все остальные данные, метрические и топологические остаются без изменения. Данное положение используется автором когда осуществляется параметризация конструкции проектируемого изделия при параметрическом синтезе заданной структуры.

При использовании этого метода набор геометрических данных, необходимых для представления объекта, менее громоздок по сравнению с аналогичными данными, касающимися дискретизации этого объекта.

При формализации все элементы конструкции разбиты на классы, подклассы, виды и т.п. за счет перечисления последовательности качественных и количественных признаков, отличающих их друг от друга. Пусть $A = \{ A_{ij}, i = 1, n, j = 1, m_i \}$ – полное множество классифицированных элементов конструкции единой технической природы, которые удовлетворяют следующим условиям.

$$A_{ij} \subset A_i, i = 1, n, A_{ij} \neq \emptyset, A_i \cap A_j \neq \emptyset, i \neq j, \\ \bigcup_i A_i = A, i = 1, n; j = 1, m_i.$$

Классификация элементов конструкции изделия для сборки по ТПМ (эту классификацию можно распространить на любой вид элементов, для любой технологии) имеет вид, представленный на рис. 72.

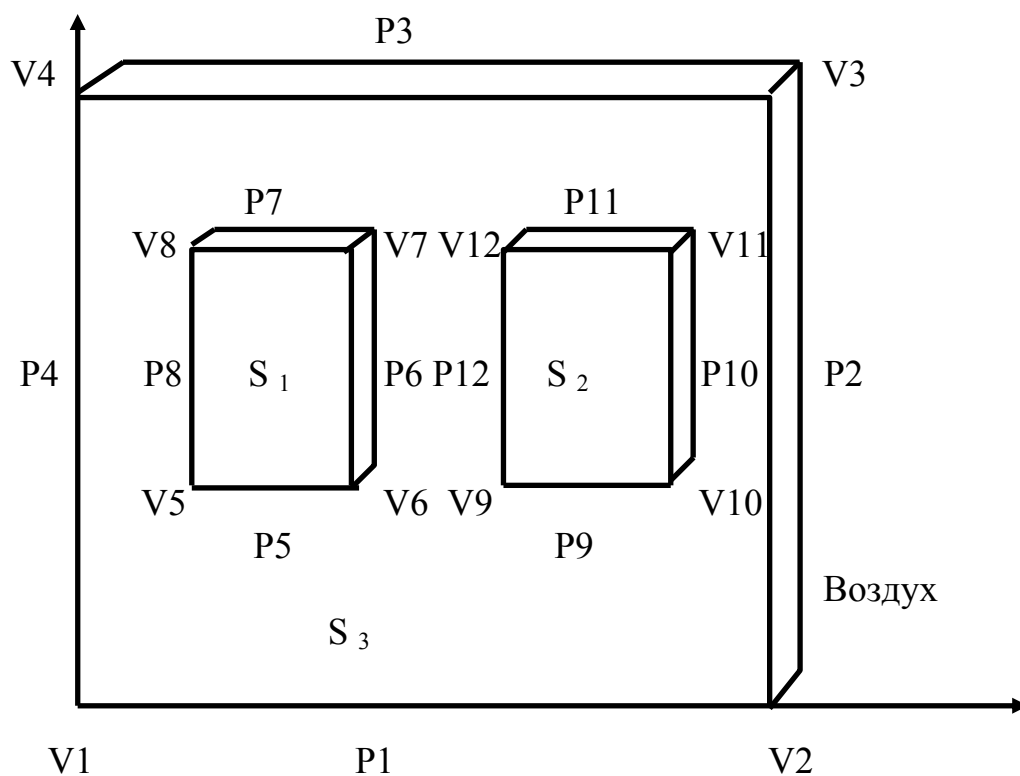


Рис. 71. Метод описания границ применительно для системы

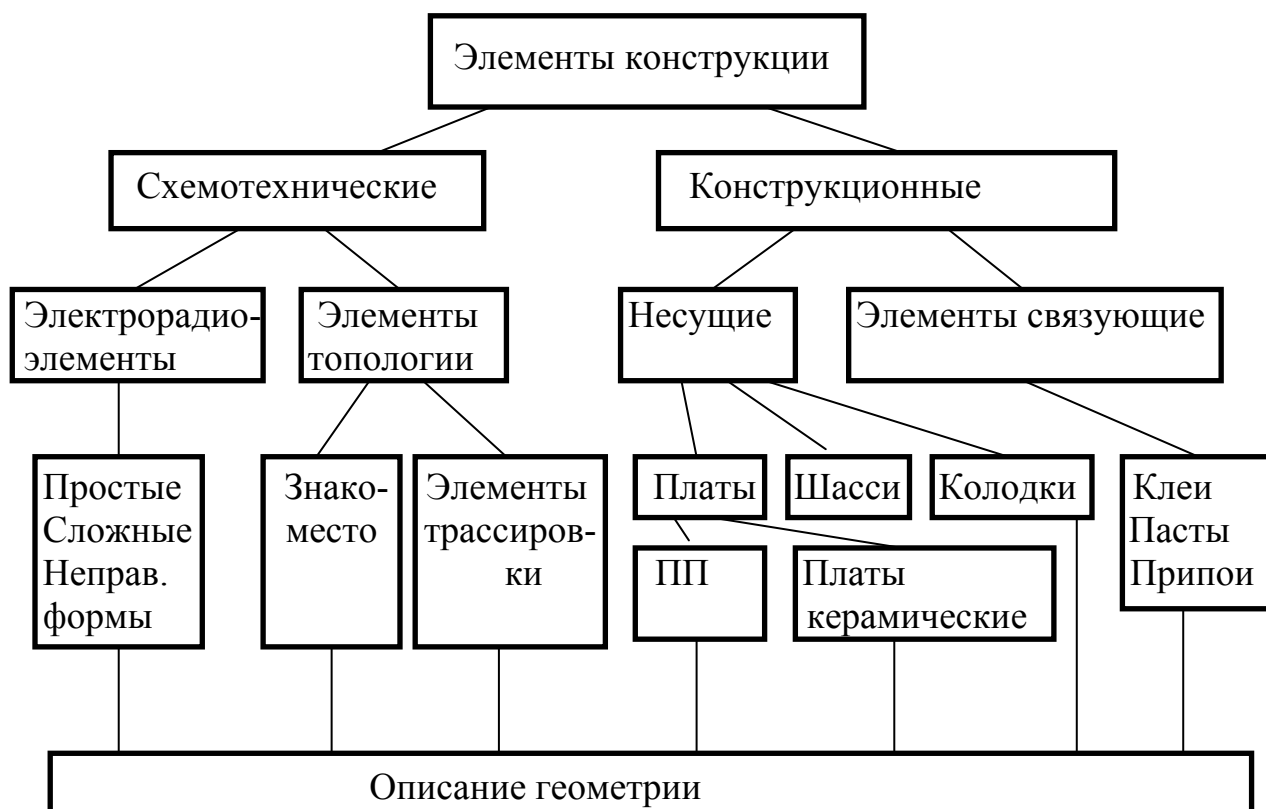


Рис.72. Классификация элементов конструкции при сборке

При описании объекта сборки изделий используется аппарат теории множеств, на основании которого объект В может быть представлен некоторым множеством элементов $\{ B_Q \}$, так что

$$B_Q = \{ A_{ij}, i \in I_B; j \in J_B \},$$

где Q – определяет класс объекта сборки; I_B, J_B - множество индексов, определяющих состав элементов конструкции, входящих в состав объекта сборки.

Вторая часть задачи морфологического описания объекта сборки заключается в описании связей между элементами конструкции. Как уже было выше указано в описании геометрии, любой элемент конструкции обладает совокупностью элементов формы, в основе которых лежат геометрические закономерности формообразования поверхностей. Форма наиболее распространенных элементарных и типовых поверхностей будет задана, если указаны: ось поверхности O, направляющая H, образующая линия L, т.е. в виде тройки

$$\Phi(O, H, L).$$

Различные виды поверхностей возникают за счет большого разнообразия форм образующих линий при сравнительно небольшом числе различных законов движения этих линий в пространстве. Так, для плоских поверхностей в качестве образующей будет прямая линия, для поверхностей вращения – окружность, для других – различные сложные кривые или сочетание прямой и окружности.

Отдельные элементы формы элемента конструкции (плоскость, цилиндр и т.п.) являются в большинстве случаев рабочими элементами форм при сборке, выполняя функции поверхности связи между сопрягаемыми элементами A_{ij} .

Определение 2. Поверхность связи – поверхность (часть) соединяющая элементы конструкции, имеющая определенное функциональное назначение, конструктивное исполнение и обладающее рядом качественных признаков и количественных параметров (контактная площадка чип-компонента, припойная площадка знакоместа на печатной плате).

Поверхности связи желательно также классифицировать по признакам (способ базирования, установки, фиксации) с целью упорядочения и облегчения формирования структурной схемы конструкции, технологического процесса сборки и монтажа изделия по ТПМ (рис. 73).

Определим множество поверхностей связи, принадлежащих любому элементу конструкции из выражения

$$\Phi_{ij} = S_{A_{ij}} = \{ S_{gl}, g \in I_{ij}; l \in J_{ij} \},$$

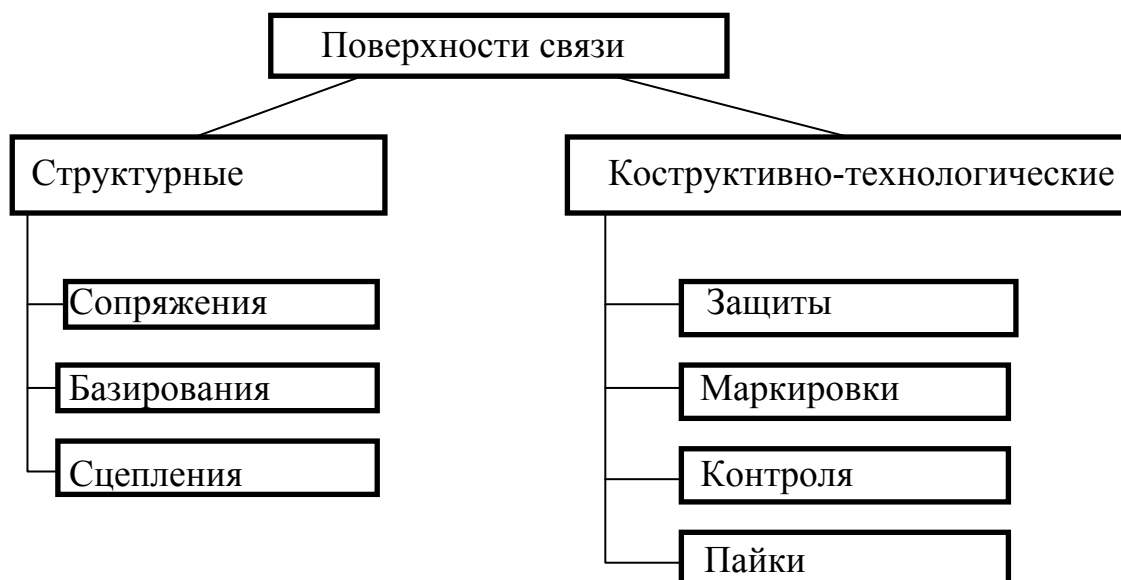


Рис. 73. Классификация поверхностей связи

где I_{ij} , J_{ij} – определяет множество индексов, относящихся к поверхностям связи элемента конструкции A_{ij} .

Таким образом, множество всех поверхностей связи S можно разбить на два подмножества: структурных S_{11} и конструктивно-технологических S_{12} поверхностей. В свою очередь подмножества S_{11} и S_{12} содержат подклассы $\{S_{2j}, j \in J_{11}(2)\}$ и $\{S_{2j}, j \in J_{12}(2)\}$ поверхностей связи, каждому из которых поставлено в соответствие отображение $Q_{ij}: A_{ij} \rightarrow S_{ij}$, описывающее конструктивно-технологические поверхности элемента конструкции в зависимости от вида этого элемента.

Таким образом, каждой поверхности типа S_{ij} , $i \in I$, $j \in J$ соответствует единственное ее геометрическое описание $\Phi(X, Y, Z) \equiv \Phi(O, H, L)$, заданное своими параметрами.

Отметим, что в объекте сборки B имеют место поверхности связи $\{S_{ij}\} \subset S$, существование которых обусловлено наличием специфических конструктивно-технологических требований, предъявляемых к объекту сборки (чип-резисторы устанавливать только резистивным слоем вверх или компоненты прямоугольной формы с односторонними контактными площадками должны быть при сборке строго ориентированы ими вниз и т.п.), вызванных его назначением, конструкторским или технологическим исполнением и отмеченных на сборочном чертеже изделия.

Тогда для любой A_{ij} и поверхности связи можно записать $\Phi_{ij} = S_{gl}^*$, если $l \in I_{ij}^*$; $g \in J_{ij}$ или $\Phi_{ij} = S_{gq}$, если $q \in I_{ij}$; $g \in J_{ij}$, где I_{ij}^* – множество специфических поверхностей связи элемента конструкции, подлежащих, например операции лужения припоем ПОС-61 при существующих $\{S_{gq}, q \in I_{ij}\}$ элементах формы указанного элемента конструкции, на которые наносить припой запрещено, согласно требованиям конструкторской или технологической документации.

Зная элементы конструкции A_{ij} и поверхности связи S_{ij} , можно перейти к построению математической модели, описывающей морфологию элемента сборки.

Определение 3. Элемент сборки – часть конструкции, определяющая соединение элементов конструкции с базовым элементом или между собой.

Под структурой элемента сборки будем понимать совокупность конечного числа отдельных элементов конструкции A со связями на уровне поверхностей связи S между ними, которую можно формально представить в виде графа $G = G(A, S)$, где $A = \{a\}$ – вершины графа, а S – его ребра.

Топологическая модель сборки в виде графа G отражает расположение и реальные поверхности связи между элементами конструкции, составляющие сборку. Целесообразно определить структуру сборки на основе смешанного графа сопряжения элементов конструкции, в котором дугам соответствует условие упорядоченности в установке элементов конструкции при сборке, а ребрам – отношение безразличного порядка, т.е. такой случай, когда вершины графа, соединяемые ребром, могут быть установлены при сборке в любом порядке.

Пример топологической модели сборки DIP-конденсатора в 2D виде приведен на рис.74 - 77. Эта модель позволяет задать последовательность сборки, путем указания направления связей (дуг) между отдельными вершинами графа G , характеризующие предшествование одного элемента другому при сборке. Это описание является основой для формирования маршрута технологического процесса сборки всего изделия.

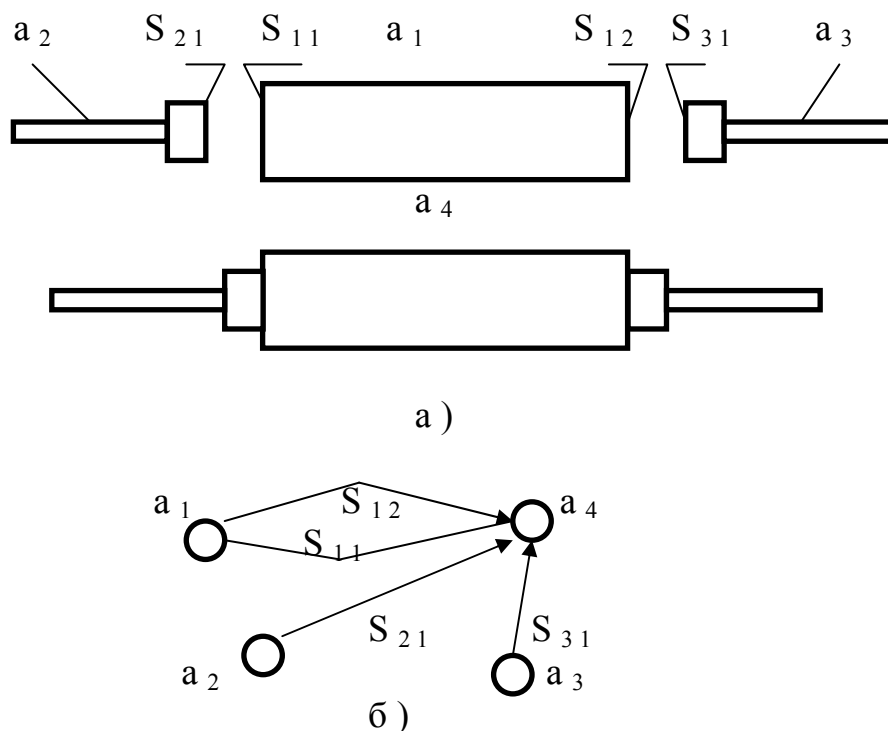


Рис. 74. Сборка и графовая модель сборки секции конденсатора

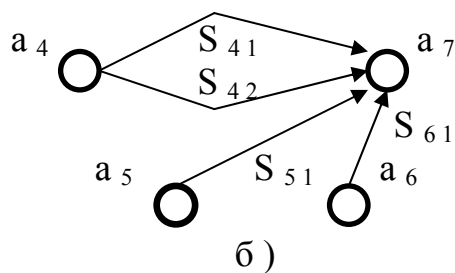
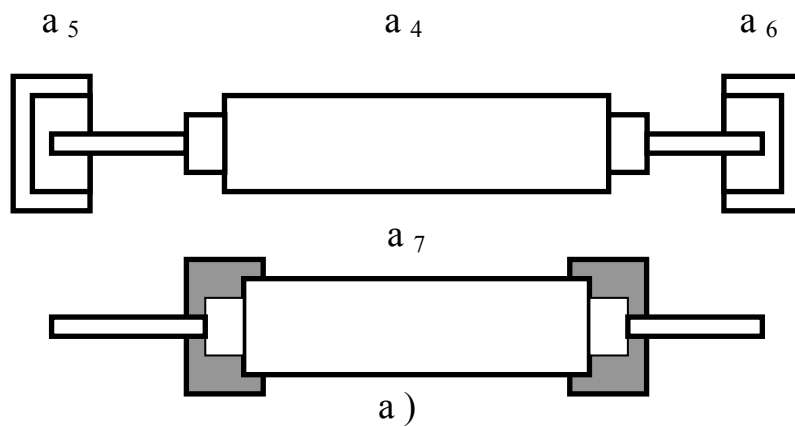


Рис. 75. Сборка пакета компонента

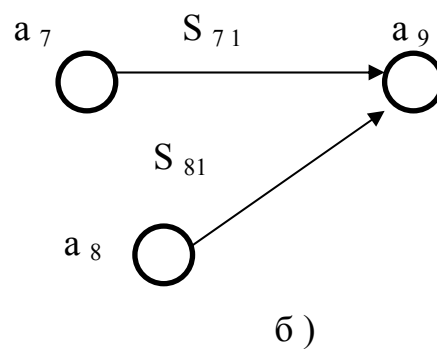
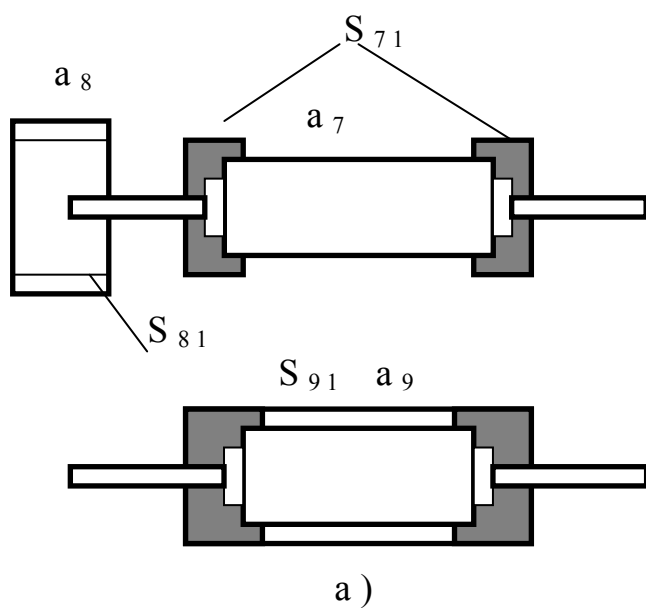


Рис. 76. Сборка корпуса компонента

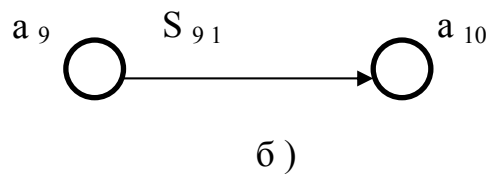
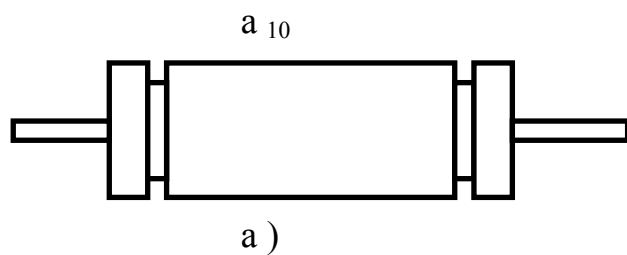


Рис. 77. Окончательная сборка компонента

На первом этапе (рис.74, а) к секции конденсатора, обозначаемого через a_1 с поверхностями S_{11} и S_{12} , присоединяются два проволочных токовых вывода a_2 и a_3 своими поверхностями связи S_{21} и S_{31} соответственно. В результате чего получается новая сборочная единица – пакет, обозначенный как a_4 . Граф $G_1 (A_1, S_1)$ первого этапа (рис.74, б) характеризуется следующими множествами:

$$A_1 = \{ a_1, a_2, a_3, a_4 \}, S_1 = \{ S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{31} \}.$$

На втором этапе на пакет a_4 надевают колпачки a_5 и a_6 , в результате образуется сборочная единица a_7 (рис.75, а). Граф $G_2 (A_2, S_2)$ второго этапа включает в себя (рис.75, б) следующие элементы:

$$A_2 = \{ a_4, a_5, a_6, a_7 \} \text{ и } S_2 = \{ S_{41}, S_{42}, S_{51}, S_{61} \}.$$

Собранный пакет на третьем этапе вставляют в трубку (корпус) a_8 , что соответствует новой сборочной единице a_9 (рис.76, а), описываемой графом $G_3 (A_3, S_3)$:

$$A_3 = \{ a_7, a_8, a_9 \}, S_3 = \{ S_{71}, S_{81} \}.$$

На последнем – четвертом этапе сборки – закрепляют пакет с колпачками в корпусе путем обжима последнего и в этом случае (рис.77, а) образуется новая сборочная единица a_{10} , существенно отличающаяся по своим параметрам от предыдущей сборочной единицы, хотя она получена без присоединения дополнительных деталей. На этом этапе сборка описывается простейшим графом $G_4 (A_4, S_4)$, включающим в себя пару вершин, связанных одной дугой (рис.77, б).

Вывод обобщенной графовой модели сборки компонента a_{10} заключается в выполнении операции объединения исходных графов, которая записывается следующим образом:

$$G (A, S) = G_1 (A_1, S_1) \cup G_2 (A_2, S_2) \cup G_3 (A_3, S_3) \cup G_4 (A_4, S_4).$$

Эта операция выполняется на основе правила [20]: множествами вершин A и дуг S объединенного графа $G (A, S)$ являются объединения соответственно множеств вершин A_i и дуг S_j исходных графов.

Построенный таким образом граф (рис. 78) является моделью изделия, в которой легко проследить все связи и последовательность сборки элементов конструкции при сопряжении поверхностей связи, а следовательно, построить ТП сборки изделия.

На рис. 80 - 82 представлены различные графовые модели сборки одного и того же сборочного узла (рис. 79).

Здесь $a_2 - a_6$ – схемотехнические элементы конструкции при сборке, a_1, a_7 – конструкционные элементы (печатная плата и припой), $a_8 - a_{15}$ – элементы сборки, сборочные единицы, формируемые после каждой операции установки и/или пайки компонентов на печатной плате.

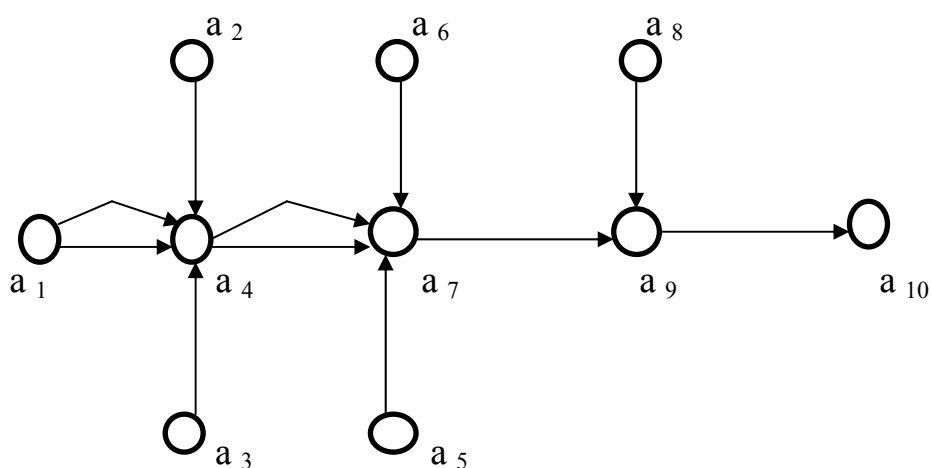


Рис. 78. Обобщенный граф сборки компонента

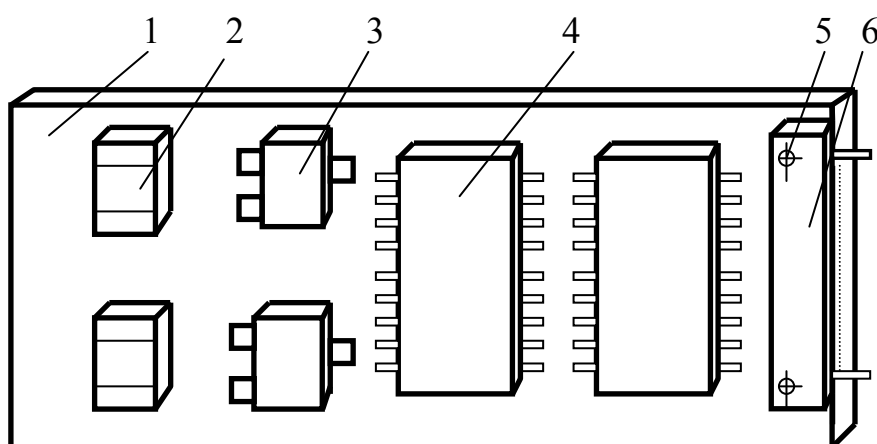


Рис. 79. Конструкция печатного узла в 3D виде:
 1 – печатная плата; 2 – резистор; 3 – транзистор;
 4 – микросхема; 5 – элементы крепления; 6 – DIP-разъем

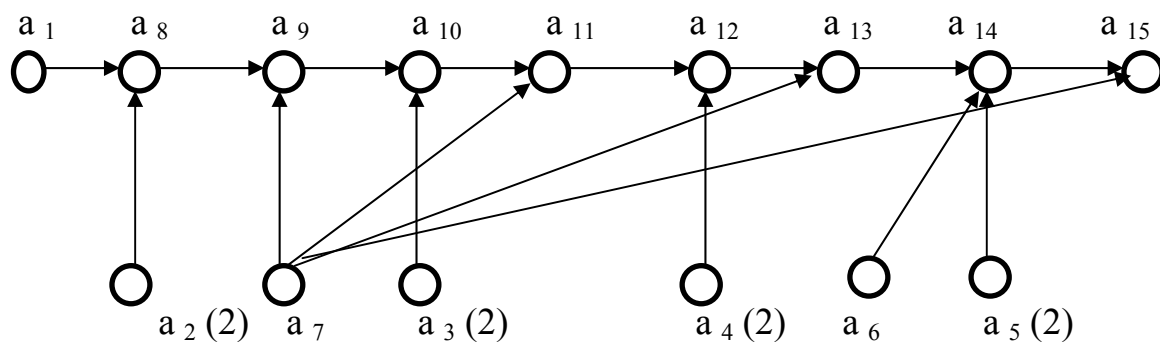


Рис. 80. Граф сборки печатного узла с индивидуальной установкой и пайкой компонентов

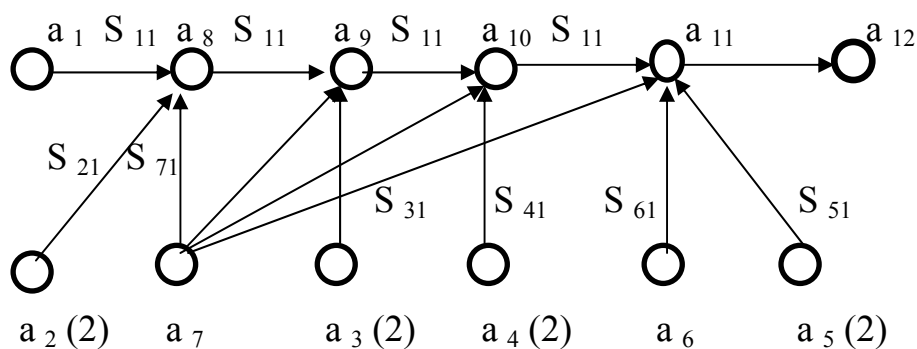


Рис. 81. Граф сборки с последовательной установкой типов компонентов и групповой пайкой

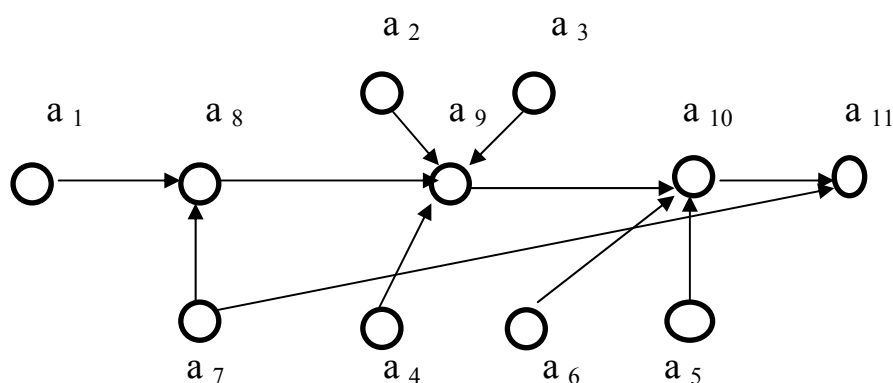


Рис. 82. Граф сборки печатного узла с нанесением пасты, параллельной установкой компонентов и групповой пайкой

Из приведенных рисунков (рис. 80 - 82) видно, что для одного и того же конструктивно-технологического решения печатного узла могут быть разработаны различные технологические процессы сборки, варианты которых определяются наличием соответствующего технологического оборудования и стоимостью процесса сборки. Тогда возникает задача выбора *extr* технологического процесса сборки, которая рассмотрена ниже.

6.3. Конструирование изделия на декомпозиционной основе

При проектировании изделия любая его модель содержит следующие параметры:

Z - множество независимых параметров, характеризующих, например среду проектирования. Так при проектировании конструкции печатного узла в качестве Z выступают габаритные размеры печатной платы.

X - множество варьируемых параметров, например в той же плате это посадочные места, на которые необходимо разместить элементы.

Y - множество выходных параметров качества проектируемого изделия.

$Y=\Phi(X,Z)$ - критериальные функции, обеспечивающие лучшие решения оптимизационной задачи, по аналогии, это критерий размещения – минимальная суммарная длина связей между элементами.

Если исходная модель $Y = \Phi(X, Z)$ является сложной, т.е. невозможно сразу найти $Y = \text{extr}$ на всём множестве варьируемых параметров, то её разбивают на ряд простых с установкой связей на уровне информационного обмена с минимизацией связей между моделями [42].

Метод решения задачи декомпозиции исходной модели создаваемого изделия складывается из трех уровней управления. На первом уровне, на уровне структурного проектирования, осуществляется декомпозиция модели на подмодели (группы) с минимизацией связей между ними, которая реализуется за несколько шагов:

1. Выявить все параметры $\{X, Y, Z\}$, оказывающие влияние на формирование исходной модели изделия.
2. Определить являются ли параметры зависимыми или нет и зафиксировать каждое решение (зависимое или нет) в матрице взаимосвязей.
3. Разложить матрицу на группы с тесной и слабой взаимосвязью между группами. Это и будут "основные" параметры, например $\{S, P, T\}$.
4. Выявить независимые параметры $L = \{L_i\} \subseteq \{S, P, T\} \subseteq \{X, Y, Z\}$ из "основных" [9].
5. Создать новую структуру, например функционально узловую, $K = F(L)$ без (с минимизацией) цикличности процесса проектирования и производства изделия с качеством K .

Рассмотрим какие связи возникают при декомпозиции исходной модели. Обозначим через V_l и V_k совокупность всех параметров подмодели (для простоты блока) l и блока k соответственно, т.е. $V_l = \{X_l, Y_l, Z_l\}$, $V_k = \{X_k, Y_k, Z_k\}$, тогда пересечение этих множеств $V_k^l = V_l \cap V_k$ определяет информационный обмен между блоками.

Основная задача декомпозиции это формирование различных видов межблочного обмена. В идеале это полная независимость блоков друг от друга, т.е. $V_k^l = \emptyset$. Тогда блок k можно проектировать самостоятельно (оптимизировать критериальную функцию $Y_k = F_k(X_k, Z_k)$ по варьируемым параметрам X_k) независимо от других блоков, что в будущем исключит цикличность процесса изготовления изделия.

В общем случае, множество V_k^l не пустое и тогда могут возникнуть различные виды [2,37] взаимосвязей между блоками k и l . Рассмотрим вариант, когда связь осуществляется только по независимым входным параметрам, т.е. $V_k^l \subset Z_k$. При этом блок k имеет независимые варьируемые параметры X_k и свои критериальные функции $Y_k = F_k(X_k, Z_k)$. В общем случае, пересечение независимых параметров Z_k блока k с множеством параметров $V_l = \{X_l, Y_l, Z_l\}$ блока l определяет непустое множество $V_k^l = Z_k \cap V_l \neq \emptyset$.

Следующий вид связей, возникающий между блоками k и l , соответствует принадлежности варьируемых параметров как блоку k , так и блоку l , т.е. $V_k^l \subset X_k$ и $V_k^l \subset X_l$. По другому это соответствует пересечению множеств варьируемых параметров X_k и X_l , которое является не пустым, т.е. $V_k^l = X_k \cap X_l \neq \emptyset$. При этом блок k имеет свои локальные независимые параметры Z_k и критериальные функции $Y_k = F_k(X_k, Z_k)$.

Теперь рассмотрим вариант связей по критериальным функциям. Это когда блоки k и l имеют непустое пересекающееся множество критериальных функций, т.е. $V_k^l = Y_k \cap Y_l \neq \emptyset$, где $V_k^l \subset Y_k$, $V_k^l \subset Y_l$. При этом блок k имеет различные множества независимых Z_k и варьируемых параметров X_k .

Тогда с точки зрения независимости блоков друг от друга и исключения цикличности в процессе проектирования изделия при прохождении этих блоков друг за другом, лучшим видом связей является первый $V_k^l = \emptyset$, как идеальный вариант. Этот вид межблочных связей характеризует удачную декомпозицию модели исходного изделия, например функционально-узловую. А если достичь такого положения не удаётся и формируются связи 2,3 и/или 4 вида, то сначала выполняется реализация второго вида связей следующим способом [46].

Например, блок k характеризуется моделью

$$Y_k = F_k(X_k, Z_k, V_k^l), \quad (4)$$

где Y_k – выходной параметр; X_k – варьируемые параметры, локальные для данного блока k ; Z_k – независимые параметры для блока k ; F_k – критериальная функция и ограничения локальны; V_k^l – параметры, поступающие от блока l в блок k .

Для локализации блока k по Z_k параметрам подадим на его вход дополнительную совокупность параметров Z_k^0 , не зависящую от блока k .

Тогда $Z_k = V_k^l \cup Z_k^0$ и условие локализации может выполняться автоматически, если $V_k^l \subseteq Z_k^0$.

Физически это означает, что множество Z_k^0 параметров содержит всю информацию, необходимую для синтеза модели (4) блока k . Это возможно когда есть общая база данных $Z = \cup Z_k^0$ в виде 3D модели, описывающая характеристики элементов изделия (под элементом понимается не только конструкция, но и технология, условия эксплуатации, параметры надёжности и т.п.). Другими словами, получаемые решения $\{X_0, Y_0\}$ отслеживают изменение среды проектирования.

Если среда проектирования Z не оптимальна, а она оказывает влияние на полученное решение, так как $Y_0 = F(X_0, Z)$, то решение, возможно, тоже будет не оптимально с позиции других блоков и всего изделия в целом (внутри блока k решение оптимально), что в конечном итоге приведет к возврату и поиску оптимальной среды проектирования. А это опять цикличность и увеличение трудоёмкости проектного решения.

Для устранения этого недостатка автором вводится второй уровень управления, где декомпозиция основана на том, что блок k , $k = 1, \dots, l, \dots, n$, разбивается на подблоки, локальные по множеству критериальных функций [2]. Другими словами, множество критериальных функций F_k разделяется на подмножества FK_i , $F_k = \{FK_i\}$, где $FK_i = \{FK_{ij}\}$, $i = 1, n$; $j = 1, m_i$; i – индекс подблока, n – множество обрабатываемых подблоков A_i второго уровня управления; m_i – число критериальных функций подблока A_i , $i = 1, n$. Частным случаем декомпозиции является условие $m_i = 1$, т.е. в подблоке рассчитывается только одна критериальная функция. Подблоки A_i , $i = 1, n$ локальны по

критериальным функциям, т.е. пересечение множеств $FK_i \cap FK_k = \emptyset$, $i \in n$, $k \in n$.

Основной вид связи для этих подблоков соответствует связи по варьируемым параметрам, при которой пересечение $XK_i \cap XK_k \neq \emptyset$, здесь $XK_i = \{X_p\}$, $XK_k = \{X_t\}$, $p = 1, P_i$, $t = 1, P_k$, где P_i и P_k – число варьируемых параметров в подблоках A_i и A_k .

Если $XK_i \cap XK_k = \emptyset$, то на этом процесс декомпозиции заканчивается и переходят к поиску оптимального решения $\{XK_0, YK_0, ZK_0\}$. А если пересечение не пустое, то продолжают декомпозицию подблока A_i на части A_i^S , локальные по множеству варьируемых параметров, т.е. до пересечения множеств $XK_i^S \cap XK_i^q = \emptyset$, $S \in B_i$, $q \in B_i$, где B_i – число элементарных частей, образованных в результате декомпозиции подблока A_i . Основной вид связи соответствует связи типа $FK_i^S \cap FK_i^q \neq \emptyset$.

Если варьируемые параметры XK_i всех образованных частей связаны функционально со всеми критериальными функциями FK_i , то $FK_i^S \subseteq FK_i = \{FKI_j\}$, $j = 1, m_i$, $XK_i^S = \{X_p\}$, $p = 1, P_i^S$, где P_i^S – число варьируемых параметров части A_i^S . Частным случаем декомпозиции является условие $P_i^S = 1$, соответствующее одному варьируемому параметру в каждой части A_i^S .

Если часть A_i^S является элементарной “деталью” производства (винт, гайка или компонент конструкции радиоэлектронных средств (РЭС) – резистор, микросхема и т.п.), то на этом второй уровень декомпозиции заканчивается. Если часть A_i^S также имеет не пустое пересечение критериальных функций $FK_i^S \cap FK_i^q \neq \emptyset$, то переходят к дальнейшему процессу декомпозиции по варьируемым параметрам XK_k для формирования подчасти AI_i с пустым пересечением по критериальным функциям $FKI_i \cap FKI_k = \emptyset$. Этот процесс декомпозиции заканчивается когда последняя подчасть $AIK...I_i$ имеет непересекающиеся множества по варьируемым параметрам $XKI...K_i^S$ и критериальным функциям $FKI...K_i^S$, либо декомпозиция достигла уровня “детали”.

Назовем этот проход - “вниз”, где за счёт декомпозиции модели $Y=F(X,Z)$, вплоть до “детали” $XKI...K_i^S \in ... \in X_i^S \in X_i \in X$, синтезируется структура изделия с минимизацией взаимосвязей между “детальями”. По этому принципу разработчиком формируется структурное описание конструкции проектируемого изделия путем графической визуализации в 3D виде элементов конструкции и отражения отношения входимости между сопрягаемыми поверхностями элементов конструкции [39,42,45] в виде графа.

Здесь на каждом уровне иерархии (рис. 83) конструируются непересекающиеся подмножества X_{ij} элементов конструкции и связей U между ними через поверхности связей. При таком подходе изделие как систему можно описать в виде графа, который определяет схему потока информации в системе от исходных данных (комплектующих) до конечного результата (изделия).

Действительно, при структурной декомпозиции исходного изделия его конструкцию воспроизводят до глубины детализации, определяемой разработчиком, например до деталей, технология которых отработана на

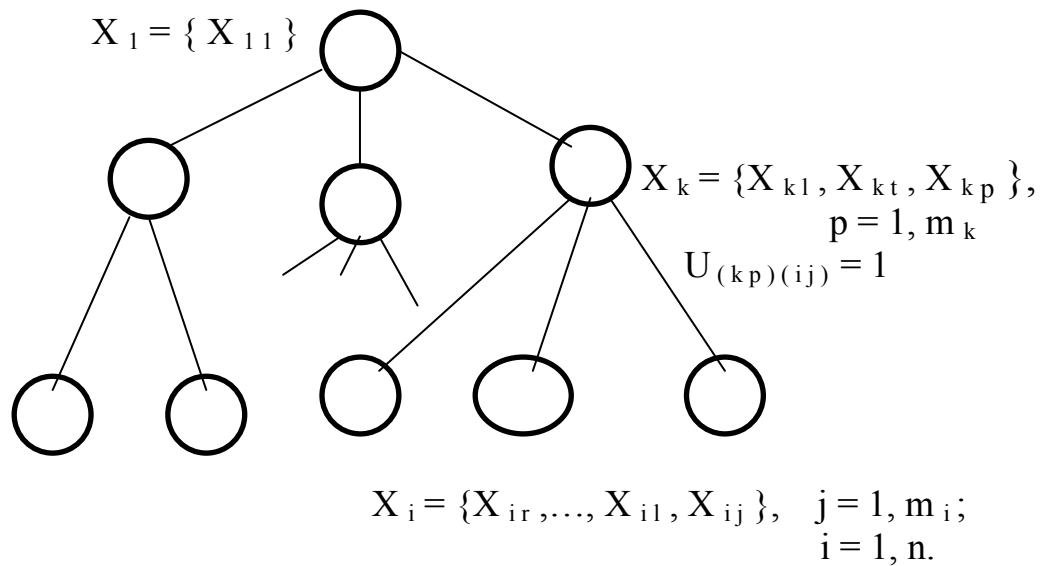


Рис. 83. Структура декомпозиции изделия

предприятия и/или комплектующих $X_{nj} \in X, j = 1, m_n$. Здесь X_n – множество деталей (комплектующих) последнего уровня детализации, из которых складывается изделие, $m_n = |X_n|$ – мощность множества $X_n, X_i \in X; i = 1, n$.

При проходе “вниз” формируются обобщенные графовые модели $G_{kp}(X_{kp}, U_{kp})$ сборочных единиц X_{kp} за счёт объединения графов $G_{ij}(X_{ij}, U_{ij})$, описывающих сборку нижестоящих компонентов X_{ij} , порождающих сборочную единицу X_{kp} .

$G_{kp}(X_{kp}, U_{kp}) = \bigcup G_{ij}(X_{ij}, U_{ij})$, при этом $X_{kp} = \bigcup X_{ij}; U_{kp} = \bigcup U_{ij}; i = 1, m_i; p = 1, m_k; k = 1, n$, для всех $U_{(kp)(ij)} = 1$. Здесь $U_{(kp)(ij)} = 1$ – наличие связи между компонентами X_{kp} и X_{ij} .

Построенный таким образом граф является моделью изделия, в которой легко проследить все связи и влияние каждой компоненты на общую характеристику модели, а следовательно, и проектируемого изделия. При таком подходе для каждого конструктивного решения изделия можно получить свою графовую модель [46].

Далее введем такое понятие, как коэффициент сложности сборки изделия, который определяется по формуле

$$K = [1 / (r - 1)] \sum K_q, \quad q = 1, r-1, \quad (5)$$

где r – число сборочных компонентов; K_q – коэффициент сложности q -го сборочного компонента изделия.

Чем сложнее конструктивное исполнение изделия, тем сложнее ТП его изготовления, в данном случае ТП сборки. Если в распоряжении конструктора и технолога имеется набор различных конструктивных решений компонентов и всего изделия, то целесообразно создавать такие конструкции и ТП

изготовления изделия, которые имеют экстремальный критерий качества. Например, коэффициент сложности сборки изделия (5) характеризует уровень технологичности конструкции, выраженный трудоемкостью ТП сборки, которая при разработке конструкции должна иметь минимальное значение.

В связи с вышеприведенным, можно сформулировать оптимизационную задачу при разработке изделия и технологического совершенствования его конструкции, а именно минимизировать $K \rightarrow \min$ при условиях реализации различных конструктивных решений изделия на производстве.

Одно конструктивное решение изделия определяет множество (рис.79-82) различных вариантов его сборки, а разнообразие конструктивных решений одного изделия ещё больше увеличивает размерность задачи. Поэтому, безусловно, актуальным является вопрос нахождения оптимального варианта конструктивного решения и оптимального варианта ТП по критерию минимума коэффициента сложности сборки, когда варьируются набор операций и их последовательность при известных значениях параметров, характеризующих каждую операцию.

Как было приведено выше, при проектировании изделия электронной аппаратуры проектировщик разрабатывает множество S различных вариантов конструктивных решений со своими показателями качества R . Под $R(x)$ можно понимать, например такой системный показатель как надежность функционирования каждого конструктивного решения $x \in S$. Кроме того, имеется n вещественных функций G^k ($k = 1, n$), определенных на множестве S , которые будем называть функциями стоимости. Так применение решения $x \in S$ потребует некоторых затрат $G^k(x)$, k -й составляющей конструкции.

Тогда задача проектирования заключается в необходимости нахождения такого варианта x^* конструктивного решения из множества S ($x \in S$), который максимизирует целевую функцию $R(x)$ при заданных ограничениях на стоимость G^k_0 , $k = 1, n$, по каждой составляющей, т.е. $\max \{R(x^*)\}$, $x^* \in S$ при ограничениях $G^k(x^*) \leq G^k_0$, $k = 1, n$.

Предположим, что на каком-то уровне декомпозиции P (рис. 84) получено m независимых элементов конструкции при декомпозиции вышестоящих элементов уровня $P-1$.

Общий выигрыш по качеству на уровне P есть сумма выигрышей, полученных в каждом независимом элементе A_i . Здесь для каждого элемента A_i , $i = 1, m$ декомпозиции изделия A имеем множество вариантов конструктивных решений S_i , целевую функцию R_i , определенную на S_i и функции стоимости G^k_i , определенные на S_i для реализации конструкции x_i в том же элементе.

Тогда задача заключается в отыскании такого оптимального множества X^* конструктивных решений (по одному решению для каждого элемента A_i), которые максимизируют целевую функцию выигрыша при наличии ограничений G^k_0 на суммарный расход ресурсов.

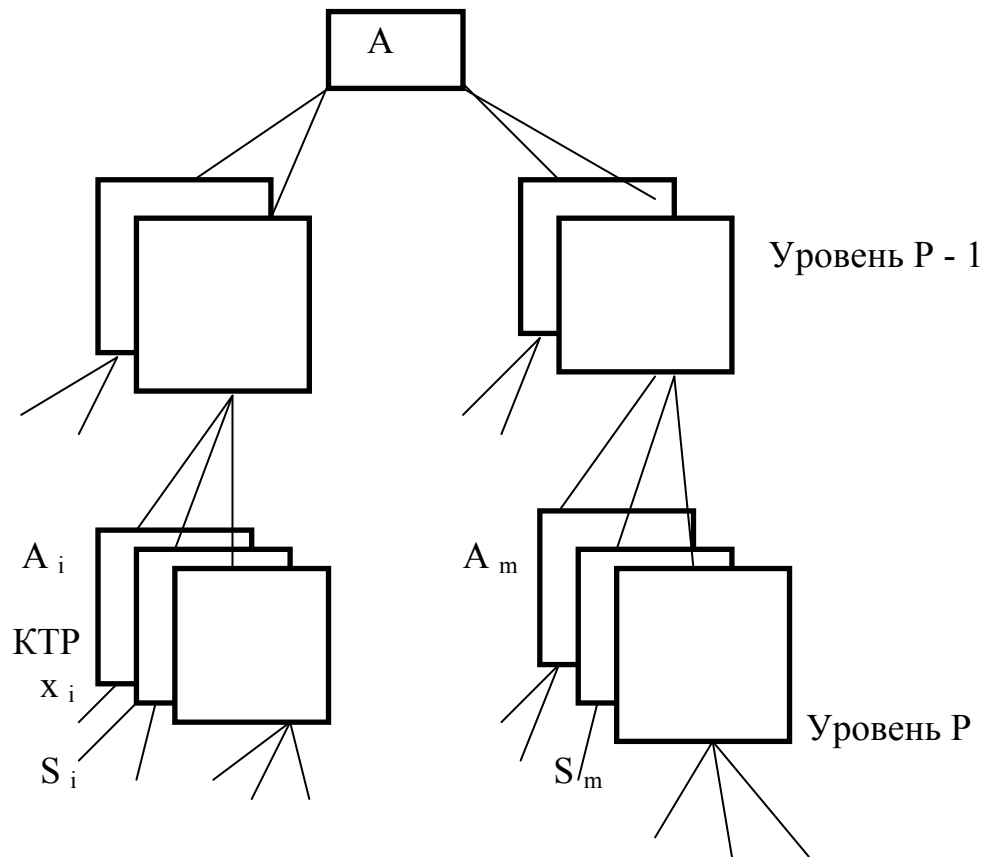


Рис. 84. Схема декомпозиции изделия А по уровням и вариантам конструктивно-технологических решений при параллельном проектировании

Учитывая предположение о независимости отказов элементов A_i и последовательную схему соединения с точки зрения надежности, задача формулируется следующим образом. Найти $x^* \in X^* \subseteq S$, максимизирующие

$$R(X^*) = \prod R_i(x_i^*) \rightarrow \max \quad (6)$$

при ограничениях

$$\sum G^k_i(x_i^*) \leq G^k_0, k = 1, n, i = 1, m. \quad (7)$$

Эффективность решения данной задачи зависит от количества созданных проектировщиком вариантов конструктивных решений. Чем больше спроектировано вариантов для каждого элемента A_i , тем точнее будет получено конечное решение. Для каждого уровня P количество рассматриваемых вариантов оценивается выражением $|S_i|^m$, где $|S_i|$ - мощность множества S_i (количество вариантов конструктивных решений для элемента A_i) и для сложных изделий электронной аппаратуры решение этой проблемы становится трудоемкой задачей.

В настоящей работе автором предлагается подход к сокращению числа проектируемых вариантов конструктивных решений элементов A_i в отдельности и всего изделия в целом.

Для этого представим вероятность безотказной работы элемента конструкции A_i выражением

$$R_i(t) = \exp(-t/T_i), \quad (8)$$

а его стоимость – выражением

$$G_i(x_i) = C_i T_i^{1/x_i}, \quad (9)$$

где t – требуемое время работы изделия по техническому заданию; T_i – среднее время наработки до отказа; C_i ; x_i – стоимостной и интегрированный показатели технологичности конструкции элемента A_i соответственно.

Из (9) найдем $T_i = (G_i/C_i)^{x_i}$, подставляя в (8), получим

$$R_i(x_i) = \exp[-t/(G_i/C_i)^{x_i}].$$

Тогда задача (6, 7) проектирования, например высоконадежного изделия на уровне P сводится не к перебору вариантов конструктивных решений, а к поиску оптимального показателя технологичности x_i для элемента конструкции A_i .

Это положение приводит к выводу о том, что прежде чем проектировать (создавать) различные варианты конструктивных решений любым способом (последовательным, параллельным), затрачивая на это время проектировщиков и выбирать из них лучшие, целесообразно определить оптимальный показатель технологичности x_i^* для каждого элемента A_i , а затем выполнить проектирование конструкции под найденный x_i^* показатель. Это значительно сократит время поиска оптимального варианта конструктивно-технологического решения изделия и постановки его на производство.

Для решения задачи обозначим через

$$T_i(x_i) = \ln R_i(x_i) \text{ и } T(X) = \ln R(X).$$

Тогда максимизация нелинейной функции $T(X)$ при линейных ограничениях (7) является частной задачей нелинейного программирования. Для решения задачи докажем лемму.

Лемма. $\Delta T_i(a) = T_i(a_2) - T_i(a_1)$ есть возрастающая функция от a , т.е. при $a_2 \geq a_1$, $\Delta T_i(a) \geq 0$.

$$\begin{aligned} \text{Доказательство. } \Delta T_i(a) &= \ln [R_i(a_2)/R_i(a_1)] = \\ &= \ln \{ \exp[-t/(G/C)^{a_2}] / \exp[-t/(G/C)^{a_1}] \} \geq 0. \end{aligned}$$

По определению логарифма имеем $-t/(G/C)^{a_2} \geq -t/(G/C)^{a_1}$, откуда $(G/C)^{-a_2} \leq (G/C)^{-a_1}$.

Неравенство справедливо, когда $a_2 \geq a_1$, что и следовало доказать.

Следствие. $T(X)$ есть вогнутая функция от X .

Доказательство. Поскольку $T_i(x_i)$ есть вогнутая функция от x_i (по лемме), постольку и функция $T(X) = \sum T_i(x_i)$, $i = 1, m$, также вогнутая.

Далее необходимо воспользоваться теоремой Куна-Таккера и доказать, что в точке x^* функция $T(x)$ достигает своего абсолютного максимума для всех $x \in X$.

Пусть $x^* = 0$ для произвольного $\lambda > 0$ и i таких, что $\Delta T_i(0) < \lambda G_i$; для остальных i определяем x_i^* как единица плюс наибольшее из X , такое, что $\Delta T_i(x) > \lambda G_i$.

Теорема. x^* максимизирует $T(x)$ по всем X , т.е. $T(x^*) > T(x)$ при $G_0(x) > G(x^*)$ при всех $X > 0$.

Доказательство. Из теоремы Куна-Таккера известно, что $[x^*, \lambda^*]$ есть глобальная седловая точка функции $F(x, \lambda)$ при $x \geq 0$, $\lambda \in W$ – множество множителей Лагранжа.

Тогда $F(x, \lambda^*) \leq F(x^*, \lambda^*) \leq F(x^*, \lambda)$ и $T(x^*) = F(x^*, \lambda^*)$.

Положим, что $x_i > x_i^*$ для $i \in J_1$ и $x_i < x_i^*$ для $i \in J_2$, где J_1 и J_2 подмножества множества $(1, 2, \dots, m)$. Для $i \in J_1$ $\Delta T_i(x_i^* + j) > \lambda G_i$, поскольку $\Delta T_i(x_i)$ есть возрастающая и вогнутая функция от x_i по лемме при $x \geq 0$. Аналогично для $i \in J_2$ имеем $\Delta T_i(x_i^* - j) < \lambda G_i$.

$$\begin{aligned} T(x^*) - T(x) &= \Delta T(x_i + j) - \Delta T(x_i - j) = \\ &= \sum_{i \in J_1} \lambda_i^* [G_0 - G_i(x_i)] - \sum_{i \in J_2} \lambda_i^* [G_0 - G_i(x_i)] = \sum_{i=1, m} \lambda_i^* [G_0 - G_i(x_i)]. \end{aligned}$$

Если $G_0 = G_i(x_i)$, $i = v+1, \dots, m$, то имеем $\lambda_i^* [G_0 - G_i(x_i)] = 0$.

Для $i = 1, u$ справедливо $G_0 \geq G_i(x_i)$. Для этих же значений $\lambda_i^* \geq 0$, следовательно $\lambda_i^* [G_0 - G_i(x_i)] \geq 0$, $i = 1, u$; $i \in J_2$. Когда $i = u+1, v$; $i \in J_1$, имеем $G_0 \leq G_i(x_i)$. Однако в этом случае $\lambda_i^* \leq 0$ и, следовательно, опять $\lambda_i^* [G_0 - G_i(x_i)] \geq 0$. Поэтому для всех $x \in X$ имеем $\sum \lambda_i^* [G_0 - G_i(x_i)] \geq 0$, $i = 1, m$. Откуда $T(x^*) - T(x) \geq 0$ или $T(x^*) \geq T(x)$.

Для получения кривой зависимости $R(X^*)$ от $G(X^*)$, повторим весь процесс для случая $\lambda \geq 0$, вычислим $R(X^*)$ и $G(X^*)$, и представим зависимость $R = \varphi(G)$ в виде графика (рис.85).

На этой кривой расположены оптимальные точки x_i , характеризующие коэффициент технологичности элемента конструкции A_i с максимальной надежностью и затратами, указанными, например в техническом задании.

Из приведенного выше можно заключить, что трудоемкость решения данной задачи, рассмотренным способом, возрастает линейно по мере увеличения числа элементов конструкции A_i , $i = 1, m$, тогда как ранее предлагаемым способом трудоемкость характеризуется экспоненциальным возрастанием времени вычисления. Это преимущество, доказанное автором, значительно сказывается при проектировании сложных устройств электронной аппаратуры.

Далее решаем задачу поиска оптимального технологического процесса сборки изделия. Для этого его графовые модели сборки представим в виде матрицы реализаций [20]. В столбцах матрицы укажем перечень компонентов, а в строках – перечень компонентов и сборочных единиц. Элементы матрицы соединим дугами, описывающими связи варианта получения сборочных единиц, в результате чего получим сетевую модель сборки изделия, каждый

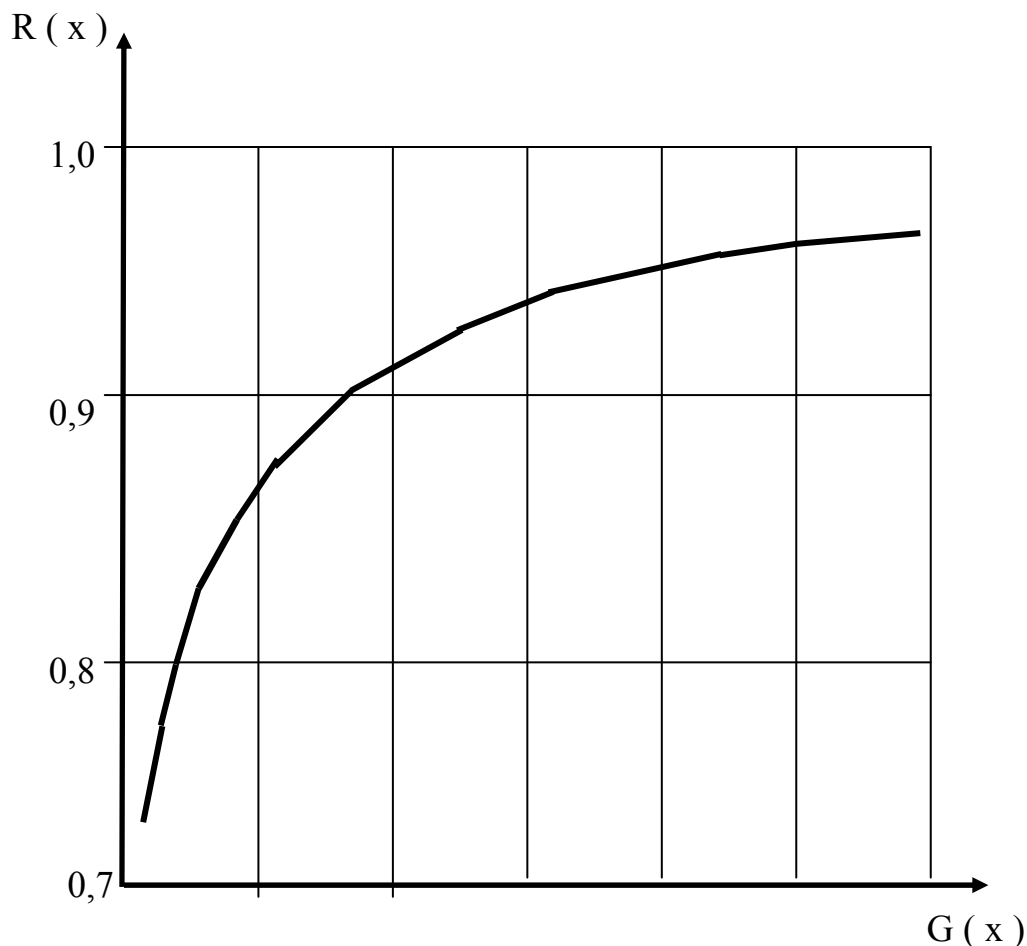


Рис. 85. Кривая оптимальной надежности

путь которой определяет вариант сборки всего изделия. Истоку модели поставим в соответствие исходную компоненту $X_{nj} \in X$ (базовую деталь), стоку – собранное изделие.

Изделие можно собрать при поштучном, парном и смешанном соединении деталей (компонентов). В последнем случае в качестве базовой детали используются две и более деталей.

Каждой дуге модели $U_{pj} \Rightarrow U_{(kp)(ij)}$ (рис. 83), здесь знак $\Rightarrow$ предполагает упрощение, т.е. наличие дуги между компонентами p и j , находящихся на уровнях k и i , определяющей операцию сборки компонента X_{kp} из компонентов X_{ij} , можно поставить в соответствие трудоёмкость сборочной операции t_{pj} . Тогда поиск оптимального варианта сборки изделия на предлагаемой модели по критерию минимальной трудоёмкости ТП сводится к нахождению кратчайшего пути на сети. Для решения данной задачи введём искомый булевый вектор Y_{pj} последовательности выполнения сборочных операций, характеризующий путь минимальной длины. Тогда оптимизационная задача сводится к поиску вектора Y_{pj} , при котором целевая

$$\text{функция} \quad F(Y) = \sum \sum t_{pj} Y_{pj} \rightarrow \min \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{при ограничениях } \Sigma Y_{jl} - \Sigma Y_{lp} &= 1, \text{ если } l = S; \\ \Sigma Y_{jl} - \Sigma Y_{lp} &= 0, \text{ если } l - \text{промежуточные;} \\ \Sigma Y_{jl} - \Sigma Y_{lp} &= -1, \text{ если } l = r, \end{aligned} \quad (11)$$

где $Y_{pj} > 0$ для всех дуг сети; l – номер вершины сети; S – номер истока; r – номер стока сети.

Сформулированная задача сведена к типовой задаче линейного программирования с булевыми переменными, для решения которой можно воспользоваться симплекс-методом.

Сущность метода заключается в следующем. Условие (11) задаёт множество допустимых решений, представляющее собой выпуклый многогранник S мерного пространства. Экстремальное значение оптимизируемого критерия (10) достигается в одной из вершин этого многогранника. Метод позволяет находить экстремальное значение $F(Y)$ в результате последовательности перехода по смежным вершинам многогранника решений в направлении монотонного улучшения значения $F(Y)$.

Алгоритм нахождения кратчайшего пути, характеризующий минимальное значение трудоёмкости ТП сборки, заключён в следующем. На предварительном шаге строится многогранник решений, для этого упорядоченно нумеруют действующие вершины модели от 1 до S , начиная с конечной, присваивая ей номер 1, исток модели получает номер S . При нумерации вершин для каждой дуги U_{jp} должно быть обеспечено выполнения условия $j < p$.

Далее алгоритм реализуется за два шага.

1. Стоку модели, вершине с номером 1, присваивается вес, равный нулю $T_1 = 0$. Двигаемся к очередным, по номеру, вершинам модели (последовательный переход по смежным вершинам многогранника) с целью назначения вершине i веса по формуле $T_i = \min(t_{ji} + T_j)$, для $i = 2, S; i, j \in \text{сети}$. (12)
Помечаем i как i^0 для тех вершин, у которых $T_i = \min$. Формула (12) позволяет определить величину T_i в порядке нумерации вершин.

2. Нахождение минимального пути по формуле $T = \Sigma t_{ji}; i, j, i^0 \in \text{сети}$.

Найденный путь является основой для построения ТП сборки изделия минимальной трудоёмкости [38,40,44].

6.4. Практическая реализация

Предложенный теоретический подход стал основой для разработки рабочего ТП (РТП) сборки ПУ, который заключается в следующем [41]:

- определение маршрута на графе типового ТП в соответствии со сборочным чертежом (рис.86) и технологической схемой сборки (рис.87). Исходными данными для разработки РТП служит последовательность значений условных переходов графа типового ТП (рис.88), определяемых по заданной технологической схеме сборки;

- определение реквизитов маршрутной карты (наименование ТП, шифр изделия, автор разработки и т.п.), согласно выбранного способа монтажа и выбранного варианта пайки;
- определение списка операций, которые необходимо выполнить для выданного варианта ТЗ;
- определение реквизитов операционной карты (материал, инструмент, режимы сборки и т.п.);
- формирование и выпуск технологической документации (ТД) на соответствующих формах.

На рис 88 приведен обобщенный граф технологического процесса сборки печатного узла выполненного по ТПМ, а в приложении – фрагмент технологической документации (маршрутная и операционная карты) на сборку печатного узла, полученный автоматизированным способом.

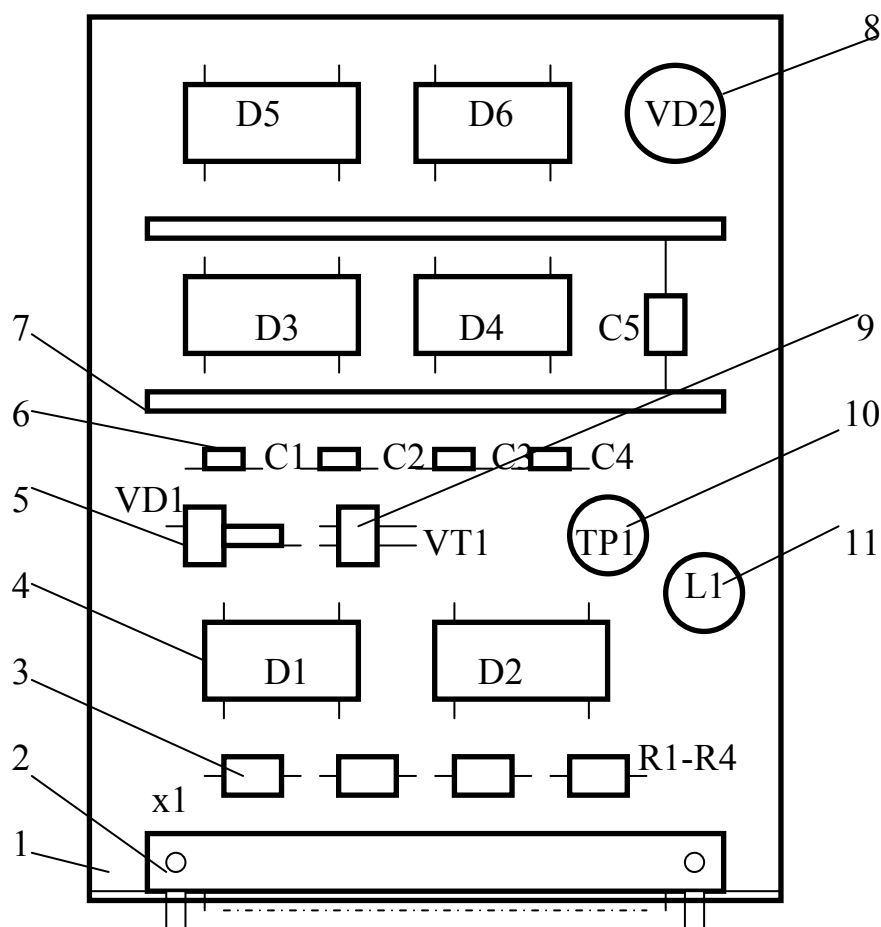


Рис. 86. Сборочный чертеж печатного узла в 2D виде

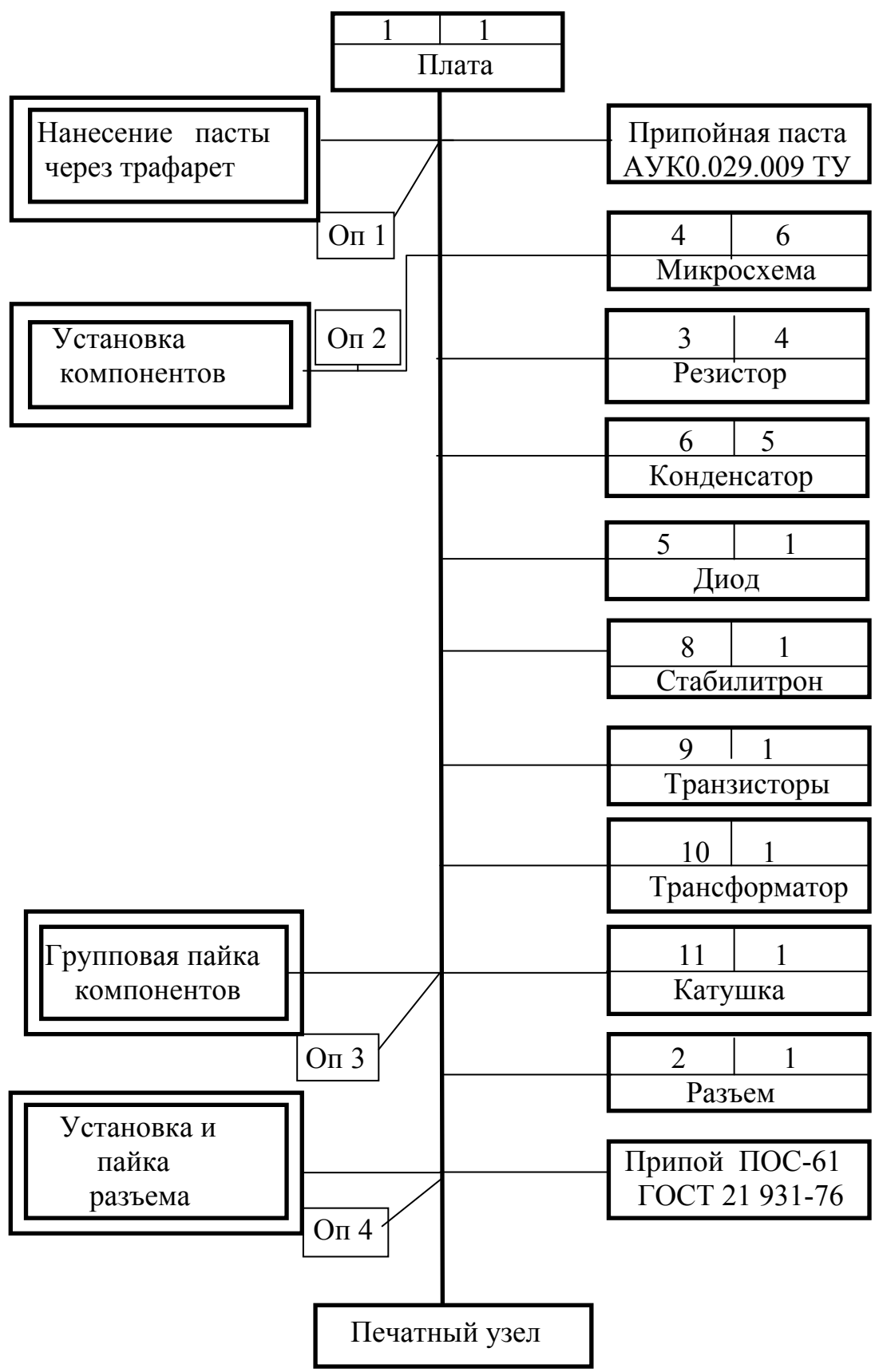


Рис. 87. Технологическая схема сборки с базовой деталью (граф сборки)

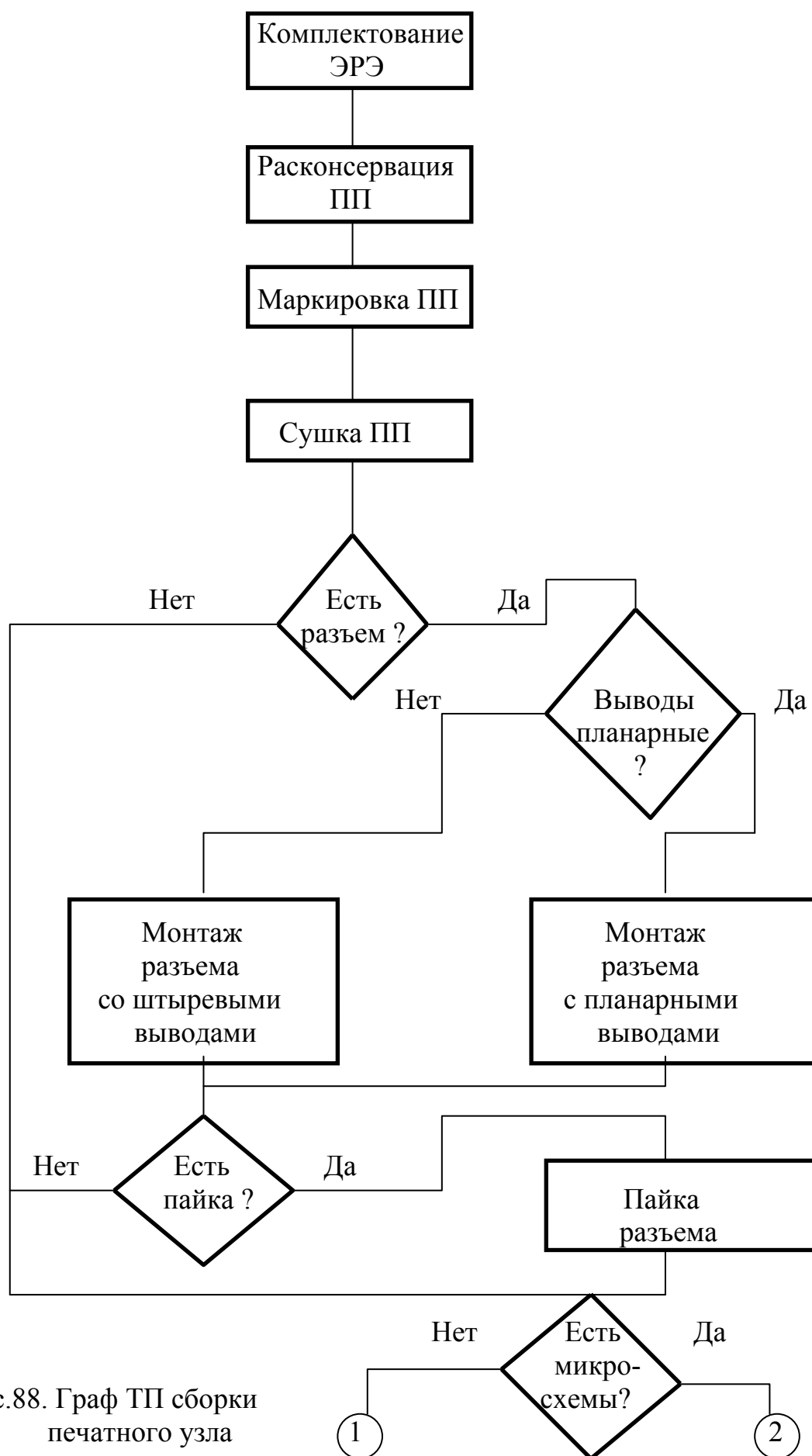


Рис.88. Граф ТП сборки печатного узла

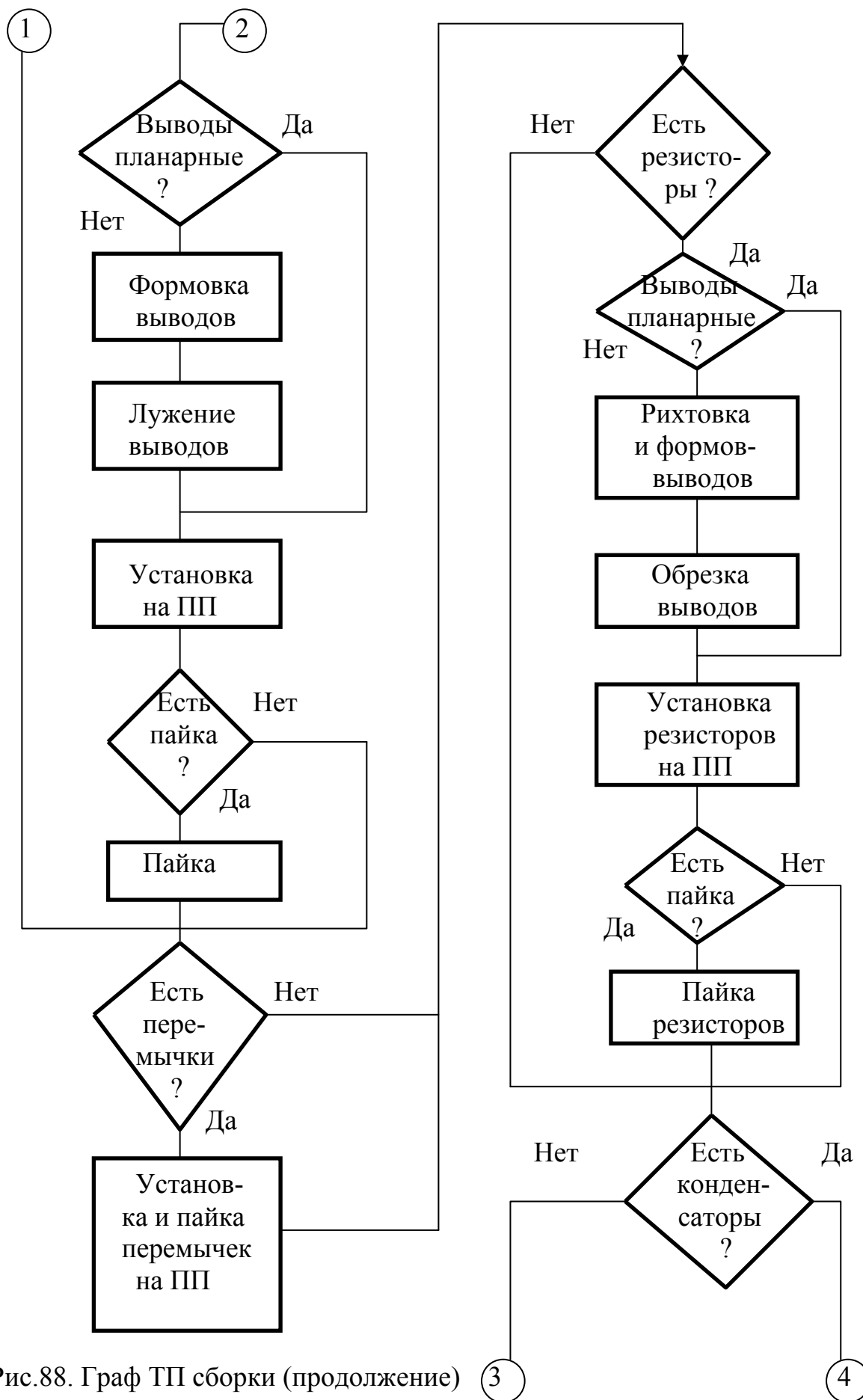


Рис.88. Граф ТП сборки (продолжение)

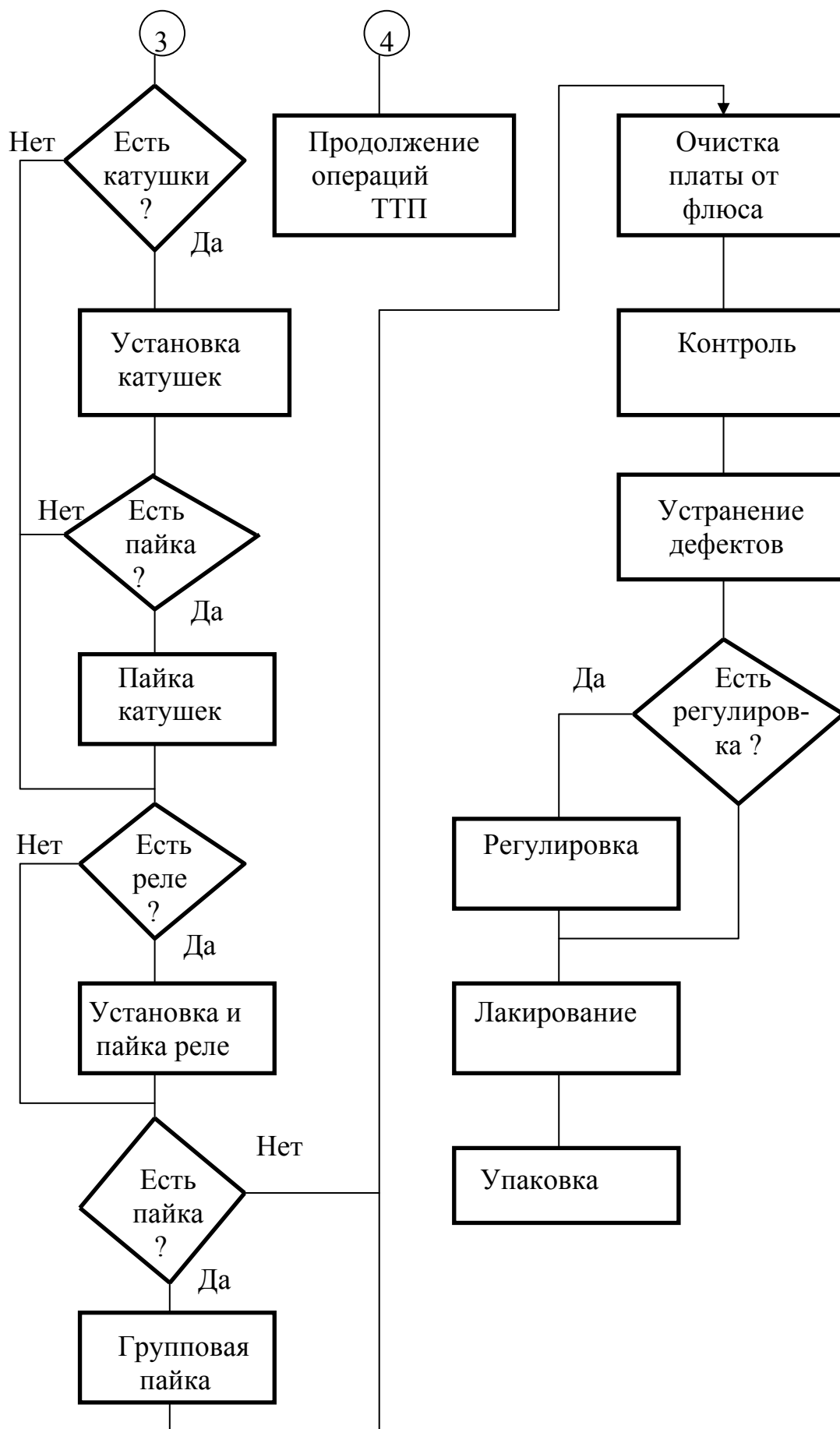


Рис.88. Граф ТП сборки ПУ (окончание)

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие ограничения имеются у 2D-систем ?
2. Из каких этапов складывается техническая подготовка производства ?
3. Почему 2D – системы увеличивают время проектирования ?
4. Когда требуется применение физических прототипов или макета и почему ?
5. При создании изделия в 2D исполнении с каким набором графических элементов приходится работать конструктору ?
6. Обеспечивает ли двухмерная система проектирования изображение изделия в изометрии ?
7. Какие преимущества несут в себе 3D системы ?
8. В какой системе возможно проектирование «по месту» ?
9. За счет чего сокращается число ошибок при проектировании изделия ?
10. Какие преимущества для проектирования несет параметризации ?
11. Для каких целей необходимо формализованное описание конструкции ?
12. Что понимается под элементом конструкции при сборке изделия ?
13. Какие методы геометрического описания деталей наиболее часто используются в конструировании ?
14. Особенности метода описания границ.
15. Особенности метода конструктивной геометрии.
16. Что такое топологические и метрические сведения об объекте ?
17. Какие операции из теории множеств применяются для построения объектов в 3D виде по методу конструктивной геометрии ?
18. Недостатки метода конструктивной геометрии.
19. Приведите пример представления объекта сборки в 2D виде.
20. Приведите пример поверхностей связи для пайки.
21. Чем обусловлено большое разнообразие технологических процессов сборки для одного и того же конструктивно-технологического решения изделия ?
22. Покажите классификацию элементов конструкции при сборке.
23. Что такое поверхность связи, её назначение ?
24. Какова классификация поверхностей связи ?
25. Дайте определение элементу сборки.
26. Какая математическая модель используется для морфологического описания процесса сборки изделия ?
27. Для каких целей используется метод декомпозиции ?
28. Сформулируйте оптимизационную задачу, которая решается при разработке технологического процесса сборки изделия.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Зарубежные фирмы-изготовители конденсаторов

Таблица 1

Фирма	Многослойные керамические конденсаторы				Электролитические		С металлизированной полиэфирной плёнкой
	Общего назначения	С большой ёмкостью	Высоковольтные	Высокочастотные	Танталовые	Алюминиевые	
AVX Corp. Мертл-Бич, Южная Каролина	1пФ-1мкФ	2,7нФ-2,2мкФ	500В-5кВ	400 МГц-4,2ГГц	0,1-100 мкФ		
ITT Components, Санта-Ана, Калифорния					0,1-100 мкФ		
Kemet Electronics Corp. Гринвилл, Южная Каролина	0,1пФ-2,2 мкФ				0,1-100 мкФ		
ITW Raktron Линггерг, Виржиния							0,1нФ-1мкФ
Kyocera North West Inc. Сан-Диего, Калифорния	1пФ-3,9 мкФ						
Mallory Capacitor Co. Индианаполис, Индиана							1нФ-0,47мкФ
Merco/Centralap Inc. Ривьера-Бич, Флорида	1пФ-1,5 мкФ				0,1-100 мкФ	0,1-22 мкФ	
Murata Erie North America. Смирна, Джорджия	0,5пФ-0,39 мкФ			СВЧ			
Roederstein Corp. Стейтсвилл, Северная Каролина					0,1-100 мкФ		1-0,47мкФ
Semtech Corp. Ньюберри-Парк, Калифорния			1-5кВ				

Фирма	Многослойные керамические конденсаторы				Электролитические		С металлизированной полиэфирной плёнкой
	Общего назначения	С большой ёмкостью	Высоковольтные	Высокочастотные	Танталовые	Алюминиевые	
SFE Technologies, Сан-Фернандо, Калифорния	10пФ-2,7 мкФ		500В-1кВ				
Siemens Components Inc, Айелин, Нью-Джерси							0,1-1мкФ
Sprague Electronic Co. Мансфилд, Массачусетс	1пФ-1мкФ				0,1-100 мкФ		
Trancitor Electronics Inc, Беннингтон, Вермонт				СВЧ	0,1-100 мкФ		
Tokin America Inc, Сан-Хосе, Калифорния		10-100 мкФ					
Vitramon Inc, Бриджпорт, Коннектикут	1пФ-1мкФ		500В	ВЧ и СВЧ			

Зарубежные фирмы – изготовители резисторов.

Таблица 2

Фирма	Тип дискретных резисторов				Типы схем	
	Толсто- лѐночн.	Тонкопл- еночные	На основе металли- ческой фольги	Проволо- чные	Толсто- лѐночн.	Тонкопл- еночные
Allen Bradley Эл-Пасо, Техас	10Ом- 2,2МОм				10Ом- 10МОм	По заказам
Bourns Inc Риверсайд, Калифорния	47Ом- 1МОм				10Ом- 1МОм	
CTS Corp. Берн, Индиана					22Ом- 1МОм	
Dale Electronics Inc Колумбус, Небраска	5Ом- 15МОм	150Ом- 250кОм		5мОм- 110,4 кОм	10Ом- 1МОм	100Ом- 100кОм
International Resistive Co. Бун, Сев.Каролина	5Ом- 5,1МОм	500Ом- 50кОм		100мОм -1,5кОм		50Ом- 100кОм
Kyocera North West Inc. Сан-Диего, Калифорния	10Ом- 2,2МОм					
Merco/Centralap Inc. Ривьера-Бич, Флорида	1Ом- 100МОм	220мОм -330кОм				
Rohn Corp. Эрвин, Калифорния	5,6Ом- 1МОм					
Sprague Electronic Co. Мансфилд, Массачусетс					22Ом- 1МОм	
Vishay Intertechnology Малверн, Пенсильвания			50Ом- 150кОм			

Отечественные фирмы – изготовители компонентов для ТПМ. Таблица 3

Фирма адрес, телефон	Продукция
МОНОЛИТ г. Витебск	Конденсаторы большой ёмкости
ЭЛЕКОНД г. Сарапул	Резисторы, конденсаторы
ИЗРД г. Новосибирск	Пассивные компоненты по заказам
ЭЛЕКОН г. Казань	По заказам
СИБЕЛКОН г. Белово	Пассивные компоненты
КОННЕКТОР г. Харьков	Пассивные компоненты
ЗАВОД НУР г. Джелал – Абад	Пассивные компоненты
СПУТНИК г. Нижний Новгород	Пассивные компоненты
ИНТЕГРАЛ г. Минск	Микросхемы
ЗАВОД ЭКСИТОН г. Павловский посад	Микросхемы
ЗАВОД РЕСУРС г. Богородник	Резисторы
ЭЛЕКС г. Александров	ВЧ и СЧ транзисторы в корпусе КТ-46, Диоды
КУЛОН г. Санкт-Петербург	Конденсаторы большой ёмкости
ПОЗИТРОН г. Санкт-Петербург	Танталовые конденсаторы
ТОО СПМ Г. Москва, тел.(095)158-73-96, Факс(095)535-26-85 Фирма – поставщик 125319 Москва, а/я 594 ул. Тверская д.10/1 тел.(095)234-01-10 факс(095)956-33-46	Резисторы постоянные 1%, 5%, подстроечные; конденсаторы керамические, танталовые, подстроечные; индуктивности – от 33 нГн до 1 мГн; диоды; диодные мосты; варикапы; светодиоды; стабилитроны; транзисторы; интегральные стабилитроны в SOT-89 Активные, пассивные компоненты Для ТПМ
АО ОСТЕК 121351 Москва, ул. И. Франко, д.4 тел.(095)146-11-25, факс(095)146-19-60	ЧИП – резисторы, ЧИП – конденсаторы, диоды, транзисторы

Отечественные фирмы – изготовители компонентов для ТПМ. Таблица 4

Завод-изготовитель	Тип компонента	Характеристики
Ресурс г. Богородицк, Тульская обл.	Резистор P1-12-0.032 P1-12-0.062 P1-12-1.0 P1-12-2.0 P1-12-0.25 P1-12-0.125 P1-12-0.1 P1-12-0.062 P1-12.-0.5	1,0x0,5x0,35 мм; 0,032 Вт 1,6x0,8x0,45 мм; 0,062 Вт 6,3x3,2x0,6 мм; 1,0 Вт 10,0x5x0,6 мм; 2,0 Вт 3,2x1,6 мм ----- 2,0x1,25 ---- с приемкой 1 5,0x2,5 мм
ПО *Элекс* г. Александров, Владимирская обл.	КТ 368А9 КТ363А9 КТ 370А9 КТ 3128А9 КД 704АС 2Д 707АС 9 2Д 706АС 9 2Д 803 АС 9 КД 629 АС 9 1N4148	ВЧ и СЧ транзисторы в корпусе КТ-46 Диоды
Завод *Кулон*, Г. Санкт-Петербург, Завод *Монолит*, г. Витебск	К10-17в К10-17-4в, К10-56	Керамические конденсаторы большой ёмкости
ЛПО *Позитрон*, г. Санкт-Петербург	К53-37 К53-42 К53-46	Танталовые конденсаторы большой ёмкости
Завод *Экситон*, Г. Павловский посад, Московская обл.	К561	Микросхемы
ПО *Интеграл*, г. Минск	К1533	Микросхемы

ГОСТ 3.1118-82 Форма 1																																	
ДУБЛ ВЗАМ. ПОДП.																																	
РАЗРАБ.	ЖИЛЬЦОВ И.В.			РИ2.XXX.001																													
ПРОВЕР.	СУСКИН В.В.			ГЕНЕРАТОР ТОНАЛЬНЫХ ПОСЫЛОК																													
Н.КОНТР.	СУСКИН В.В.																																
А ЦЕХ УЧ ОПЕР КОД.НАИМЕН.ОПЕРАЦИИ				ОБОЗНАЧЕНИЕ ДОКУМ.																													
Б КОД.НАИМЕНОВАНИЕ ОБОР. СМ ПРОФ Р УТ КР КОИД ЕН ОП КШТ ТПЗ Т ШТ																																	
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 10%;">A1 174</td> <td style="width: 10%;">010</td> <td style="width: 30%;">НАНЕСЕНИЕ ПАСТЫ</td> <td style="width: 50%;">МОНТАЖНЫЙ СТОЛ</td> </tr> <tr> <td>A2 174</td> <td>020</td> <td>УСТАНОВОЧНАЯ</td> <td>МОНТАЖНЫЙ СТОЛ</td> </tr> <tr> <td>A3 174</td> <td>030</td> <td>ПАЯЛЬНАЯ</td> <td>ИНФРАКРАСНАЯ ПЕЧЬ</td> </tr> <tr> <td>A4 174</td> <td>040</td> <td>МОНТАЖНАЯ</td> <td>МОНТАЖНЫЙ СТОЛ</td> </tr> <tr> <td>A5 174</td> <td>050</td> <td>ПАЯЛЬНАЯ</td> <td>МОНТАЖНЫЙ СТОЛ</td> </tr> <tr> <td>A6 178</td> <td>060</td> <td>КОНТРОЛЬНАЯ</td> <td>УТК-2 УСТАНОВКА КОНТРОЛЯ</td> </tr> </table>										A1 174	010	НАНЕСЕНИЕ ПАСТЫ	МОНТАЖНЫЙ СТОЛ	A2 174	020	УСТАНОВОЧНАЯ	МОНТАЖНЫЙ СТОЛ	A3 174	030	ПАЯЛЬНАЯ	ИНФРАКРАСНАЯ ПЕЧЬ	A4 174	040	МОНТАЖНАЯ	МОНТАЖНЫЙ СТОЛ	A5 174	050	ПАЯЛЬНАЯ	МОНТАЖНЫЙ СТОЛ	A6 178	060	КОНТРОЛЬНАЯ	УТК-2 УСТАНОВКА КОНТРОЛЯ
A1 174	010	НАНЕСЕНИЕ ПАСТЫ	МОНТАЖНЫЙ СТОЛ																														
A2 174	020	УСТАНОВОЧНАЯ	МОНТАЖНЫЙ СТОЛ																														
A3 174	030	ПАЯЛЬНАЯ	ИНФРАКРАСНАЯ ПЕЧЬ																														
A4 174	040	МОНТАЖНАЯ	МОНТАЖНЫЙ СТОЛ																														
A5 174	050	ПАЯЛЬНАЯ	МОНТАЖНЫЙ СТОЛ																														
A6 178	060	КОНТРОЛЬНАЯ	УТК-2 УСТАНОВКА КОНТРОЛЯ																														
МК																																	

Маршрутная карта сборки печатного узла

				ГОСТ 3.1118-82		Форма 1Б	
ДУБЛ							
ВЗАМ.							
ПОДП.							
						РИ2.XXX.001	
А ЦЕХ УЧ ОПЕР КОД.НАИМЕН.ОПЕРАЦИИ						ОБОЗНАЧЕНИЕ ДОКУМ.	
Б КОД.НАИМЕНОВАНИЕ ОБОР. СМ ПРОФ Р УТ КР КОИД ЕН ОП КШТ ТПЗ Т ШТ							
A1	040	ПАЯЛЬНАЯ	ИОТ №5/174 ДЛЯ МОНТАЖНИКА				
A2	МЕСТНАЯ ВЫТЯЖНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ						
B3	ИНФРАКРАСНАЯ ПЕЧЬ		МОНТ			1	
O4	1 МЕРЫ ЗАЩИТЫ ОТ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ПО СТП.ВС0.054.004-87						
T5	БРАСЛЕТ ВС 41111-8607						
O6	2 ПОЛУЧИТЬ ПЕЧАТНУЮ ПЛАТУ РГРТА 341.001 (ПОЗ.1 ПЛАТА ПЕЧАТНАЯ)						
O7	В КОЛ.1 ШТ. С УСТАНОВЛЕННЫМИ КОМПОНЕНТАМИ						
O8	3 УСТАНОВИТЬ ПЕЧАТНУЮ ПЛАТУ В ИНФРАКРАСНУЮ ПЕЧЬ						
O9	4 ПРОИЗВЕСТИ ПАЙКУ						
O10	5 ВЫНУТЬ ПЕЧАТНУЮ ПЛАТУ						
O11	6 ПРОИЗВЕСТИ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ С КОМПОНЕНТАМИ						
O12	7 ИОТ №5/174 ДЛЯ МОНТАЖНИКА						
OK							

Фрагмент операционной карты пайки компонентов в ИК-печи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бикулов С. Переход от 2D к 3D в T-Flex CAD/CAM // САПР и графика, №12,2000. С.74-77.
2. Вермишев Ю.Х. Основы автоматизированного проектирования .-М.: Радио и связь, 1982. –280 с.
3. Гопунский В.Г., Панов Л.И. Технология монтажа на поверхность в радиоэлектронном приборостроении // Техника средств связи. Сер. ТПО.: Науч. техн. сб. Вып. 1, 1990. С. 3-4.
4. ГОСТ 20.39.405-84. Изделия электронной техники для автоматизированной сборки аппаратуры. Общие требования.
5. ГОСТ 17457-88. Микросхемы интегральные. Основные размеры.
6. ГОСТ 18472-88. Приборы полупроводниковые. Основные размеры
7. Григорьев В.Н., Гриненко А.П., Казаков А.А. Монтаж на поверхности. Элементная база. М.:Изд-во стандартов, 1993. - 148 с.
8. Грязнов В. В. и др. Конструктивная база высокопроизводительных ЭВМ // Вопросы радиоэлектроники. Экспресс-информация. 1997, №1. С.59-66.
9. Джонс Дж.К. Методы проектирования. –М.: Мир, 1986. – 326 с.
- 10.Капур К., Ламберсон Л. Надёжность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980.- 604 с.
- 11.Каушанский Н.И. Исследование ТПМ узлов на совместимость компонентов и плат по температурному расширению //Техника средств связи. Сер. ТПО.: Науч. техн. сб. Вып.4,1990.С.26-29.
- 12.Коледов Л.А., Заводян А.В., Королькевич В.А. Поверхностный монтаж компонентов - новое направление в конструировании и производстве микроэлектронной аппаратуры // Зарубежная электронная техника.1988, №3.С.3-107.
- 13.Коледов Л.А., Заводян А.В., Королькевич В.А. Поверхностный монтаж компонентов - новое направление в конструировании и производстве микроэлектронной аппаратуры // Зарубежная электронная техника.1988, №4.С.3-97.
- 14.Коненков Ю.К., Ушаков И.А. Вопросы надёжности радиоэлектронной аппаратуры при механических нагрузках. М.:Сов. радио, 1975. - 144 с.
- 15.Кузнецов Б.С. Анализ элементной базы для монтажа на поверхность печатных плат // Техника средств связи. Сер. ТПО.: Науч. техн. сб. Вып.4,1990.С.17-20.
- 16.Кузнецов Б.С. Опыт использования технологии монтажа на поверхность печатных плат // Техника средств связи. Сер. ТПО.: Науч. техн. сб. Вып.4,1991.С.73-75.
- 17.Лаймен Дж. Новые методы и материалы для изготовления печатных плат // Электроника. 1978, №9 С.33-47
- 18.Ларин В.С., Лучкова Л.В. Проблемы очистки печатных плат в технологии поверхностного монтажа // Приборы и системы управления.№8,1991.С.43-44.

- 19.Ларин В.С., Радек С.Л. Технология поверхностного монтажа - основа повышения эффективности сборочно-монтажного производства РЭА // Приборы и системы управления. №7, 1991.С.26-30.
- 20.Мелихов А.Н. Ориентированные графы и конечные автоматы. –М.: Наука, 1971. – 416 с.
- 21.Меркушева Н.Г., Мурашкина Н.В., Стаховская С.С. О некоторых итогах изучения вопросов поверхностного монтажа // Техника средств связи. Сер. ТПО.: Вып.1,1990.С.8-12.
- 22.Механические воздействия и защита радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для вузов/ Н.И. Каленкович, Е.П. Фастовец, Ю.В. Шамгин. Минск: Высшая. шк., 1989. - 244 с.
- 23.Монтаж на поверхность: Технология. Контроль качества. / Григорьев В. Н. и др. – М.: Изд-во стандартов, 1991. - 180 с.
- 24.Монтаж на поверхность / В. Н. Григорьев, А. П. Гриненко, А. А. Казаков. Под общ. ред. И.О. Шурчкова. - М.: Изд-во стандартов, 1993. - 60 с.
- 25.Монтаж на поверхность: Технология. Контроль качества / Под ред. И.О. Шурчкова - М.: Изд-во стандартов,1991. - 184 с.
- 26.Мэнгин Ч. Г., Макклелланд С. Технология поверхностного монтажа: Пер. с англ. - М.: Мир,1990. - 276 с.
- 27.Освищер П.Н., Хробинский Г.М. Совершенствование конструкций электронных модулей для поверхностно-монтируемых изделий // Приборы и системы управления.№7, 1991.С.33-36.
- 28.Патент "Плата на подложке из эмалированного алюминия". Пат. 4842959(США),МКИ 4 В 32 В 15 /04/ Maeda Ryu: The Furukawa Electric Co, Ltd-w107944; Заявл. 13.10.87; Оpubл. 27.06.89; Приор. 17.10.86. №159140[u] (Япония); НКИ 428/630
29. Патент "Эмалированная подложка для ПМ": Заявка 6431444 Япония, МКИ 4 Н 01 L 23/14/ Нумадзири Фумия, Ямагути Кэндзи- w62188626. Заявл. 28.07.87; Оpubл. 1.02.89//Кокан токкё кохо, Сер.7(2)-1989.-30.с.207-214-Яп.
- 30.РУК0075.000.Ред.1-88. Руководящие указания по конструированию радиоэлектронных узлов, изготавливаемых с применением технологии монтажа на поверхность.
- 31.Рекламный каталог ЗАО предприятия ОСТЕК. –М.: ОСТЕК,1998. - 64 с.
- 32.Сабоннадьер Ж.-К, Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. –М.: Мир, 1989. – 192.
- 33.Сокол В.А., Воробьёва А.И., Врублевский И.А., Пархун В.М. Печатные платы на металлических основаниях //Зарубежная радиоэлектроника. №5, 1991. С. 43-64.
- 34.Сускин В.В., Лобанов С.А. Проектирование топологии в технологии поверхностного монтажа // Проблемы автоматизированного проектирования: Межвузовский сборник научных трудов. Рязань, 1996. С 59-62.
- 35.Сускин В. В. Знакомство и профиль места пайки в ТПМ // Автоматизация и современные технологии. №6, 2000. С.27-29.

- 36.Сускин В.В. Анализ влияния температурных колебаний на надёжность функционирования РЭС // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. №10, 2000. С.34-35.
- 37.Сускин В.В. IV ступень автоматизации производства // Новые информационные технологии в вузах и на предприятиях легкой промышленности : Всеросс. науч.-метод. конф./ СПб: Изд. СПГУТД, 1998. С.15-19.
- 38.Сускин В.В., Добрынин П.А. Задача назначения при конструировании печатной платы в ТПМ компонентов // Системы управления и информационные технологии. Межвуз.сб.науч.трудов, Воронеж, ВГТУ, 1998. С.129-136.
- 39.Suskin V.V. Virtual manufacture – new step of automation of manufacture // Interactive Systems: The Problems of Human – Computer Interaction. – Proceedings of the International Conference. – Ulianovsk, 1999.
- 40.Сускин В.В., Лобанов С.А. Технология поверхностного монтажа. //Учеб. пособие. Рязань, РГРТА, 1999.- 64 с.
- 41.Сускин В.В., Добрынин П.А., Громов С.В. САПР СБОРКА: Мет.указания, Рязань, РГРТА, 1996. – 16 с.
- 42.Сускин В.В. Об одном подходе к управлению проектированием изделий в компьютерно-интегрированном производстве // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, №4,2000.
- 43.Сускин В.В. Об одной задаче обеспечения надежности изделия // Проблемы обеспечения надежности и качества приборов и систем. Воронеж, ВГТУ, 2000.
- 44.Сускин В.В. Интеллектуальная автоматизированная подсистема технологической подготовки производства РЭС // Континуальные, логико-алгебраические и нейросетевые методы в науке, технике и экономике. Междун. НТК, Ульяновск, 2000
- 45.Сускин В.В. Параллельное проектирование РЭА под ТПМ на этапе технической подготовки интегрированного производства // Труды междун. Форума по проблемам науки, техники, образования, -М.: 2000. С.110-111.
- 46.Сускин В.В. Автоматизированная подготовка технологических процессов // Автоматизация и современные технологии, №2, 2001.
- 47.Тюрин С.Н. Поверхностный монтаж с применением припойных паст // Приборы и системы управления.№8, 1991.С.40-41.
- 48.Уваров А. С. Способ доработки функциональных узлов, построенных с использованием БИС // Вопросы радиоэлектроники. Экспресс-информация. №1, 1997.С.71-73.
- 49.Ульянов Г.Н. Оборудование для монтажа ИЭТ на поверхность печатной платы // Техника средств связи. Сер. ТПО.: Науч. техн. сб. Вып.4,1990.С.21-23.
- 50.Ушаков И.А., Коненков Ю.К. Методы расчета надежности аппаратуры при механических нагрузках. –М.: Знание, 1993.- 144 с.
- 51.Фангоф Ж.И., Терешкин В.А., Миронюк Г.В. Печатные платы под поверхностный монтаж // Приборы и системы управления.№7, 1991.С.33-35.

- 52.M.Itoh Direct Mounting of Chip Carriers on printed wiring boards // NEC Res. and Dev.,n.65.April 1982.P.33-38.
- 53.Dorsey D.P. et.al. // RCA Review, 1981, v4, №2.
- 54.Hatfield W. Circuit Manufacturing, 1978, №2.
- 55.Tsuyama K., Nakayama H., Okamura T. Technikal paper,1987

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава первая. Компоненты поверхностного монтажа.....	5
1.1.Пассивные компоненты.....	5
1.1.1.Постоянные резисторы.....	5
1.1.2.Переменные резисторы.....	8
1.1.3.Конденсаторы постоянной ёмкости.....	9
1.1.4.Подстроечные конденсаторы.....	13
1.2.Активные компоненты.....	13
1.3.Технологические особенности монтажа компонентов.....	19
1.4.Знакоместо для компонентов.....	21
1.5.Эффект “надгробного камня”.....	33
Вопросы для самоконтроля.....	37
Глава вторая. Монтажные платы.....	38
2.1.Конструкция печатного рисунка.....	38
2.2.Технология изготовления печатных плат.....	39
2.3.Материалы для изготовления плат.....	39
2.4.Защитная маска.....	51
Вопросы для самоконтроля.....	53
Глава третья. Технология монтажа.....	54
3.1.Варианты поверхностного монтажа.....	54
3.1.1. Чисто поверхностный монтаж.....	55
3.1.2. Смешанно-разнесенный монтаж.....	55
3.1.3. Смешанный монтаж.....	56
3.2. Методы пайки.....	59
3.2.1. Пайка двойной волной припоя.....	59
3.2.2. Пайка в парогазовой фазе.....	60
3.2.3. Пайка в инфракрасной печи.....	61
3.2.4. Другие методы пайки.....	68
3.3 Сравнение методов пайки в парогазовой фазе и в ИК-печи.....	70
3.4 Сравнение методов пайки волной припоя и в ИК-печи.....	70
3.5 Паяльная паста.....	73
Вопросы для самоконтроля.....	76

Глава четвертая. Надежность. Контроль качества	78
4.1 Профиль места пайки.....	78
4.2 Объемное сопротивление.....	84
4.3 Механические воздействия.....	87
4.4 Контроль функционирования.....	96
4.5 Ремонт в технологии поверхностного монтажа.....	100
Вопросы для самоконтроля.....	102
Глава пятая. Трафаретная печать в ТПМ	103
5.1. Трафареты в ТПМ.....	104
5.2.Оборудование для трафаретной печати.....	109
Вопросы для самоконтроля.....	115
Глава шестая. Техническая подготовка производства.....	116
6.1.Конструирование электронных изделий в 3D виде.....	116
6.2.Формализованное описание конструкции.....	119
6.3.Конструирование изделия на декомпозиционной основе.....	132
6.4.Практическая реализация.....	142
Вопросы для самоконтроля.....	148
Приложение.....	149
Список литературы.....	156