

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра электропривода и автоматизации

Составитель
В. А. Негадаев

МОНТАЖ И НАЛАДКА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Методические материалы

Рекомендованы учебно-методической комиссией направления подготовки
11.03.04 Электроника и наноэлектроника в качестве электронного издания
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2018

Рецензенты:

Григорьев А. В. – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации

Семыкина И. Ю. – председатель учебно-методической комиссии направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Негадаев Владислав Александрович

Монтаж и наладка электронных устройств: методические материалы [Электронный ресурс] для обучающихся направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, профиль Промышленная электроника, очной формы обучения / сост. В. А. Негадаев; КузГТУ. – Кемерово, 2018. – Систем. требования: Pentium IV; ОЗУ 8 Мб; Windows XP; мышь. – Загл. с экрана.

Методические материалы по дисциплине «Монтаж и наладка электронных устройств» предназначены для использования при выполнении практических и лабораторных работ, а также при самостоятельной подготовке к занятиям. Для занятий приведены цели работ, общие сведения об изучаемом материале, вопросы для самопроверки и список рекомендуемой литературы.

© КузГТУ, 2018
© Негадаев В. А.,
составление, 2018

Оглавление

1. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1 Конструирование печатных плат	4
2. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2 Изучение основ монтажной пайки.....	14
3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3 Изучение основ монтажной микросварки.....	24
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 Изучение пайки паяльниками	36
5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 Изучение припоев для монтажной пайки.....	56
6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 Изучение флюсов для монтажной пайки	64
7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 Изучение непаяльных методов неразъемных соединений	70
8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 Изучение технологии поверхностного монтажа	85
9. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 Изучение последовательности сборки и монтажа электронных модулей	93
10. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
11. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА	108

1. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1

Конструирование печатных плат

Цель работы. Изучить геометрические и численные характеристики монтажного поля печатной платы, материалы монтажных оснований, рекомендации по конструированию печатных плат применительно к автоматизированной сборке.

1.1. Требования к печатным платам

Требования к сборочно-монтажному производству.

1. Плотность монтажного поля. Размеры контактных площадок для монтажа и зазоров между ними во многом определяют составляющие технологии сборочно-монтажного производства.

2. Размеры групповой заготовки, устанавливаемой на конвейер сборочно-монтажной линии.

3. Система совмещения (система базирования) с реперными знаками заготовки и прицелами для установки многовыводных компонентов на рабочем поле платы. Форма и точность позиционирования реперных знаков и контактных площадок монтажного поля должны быть согласованы между производителями печатных плат и сборочно-монтажным производством.

4. Финишные покрытия под пайку во многом определяют выбор флюсов, типов паст, температурные режимы пайки. Длительная способность финишных покрытий к пайке – одно из главных условий устойчивости сборочно-монтажного производства.

5. Коробление печатных плат. Зачастую платы бракуются из-за неприемлемого коробления, не позволяющего принять ей плоского состояния, необходимого для принтера и для установщика компонентов.

6. Нагревостойкость печатных плат определяет приемлемость температурных режимов пайки. Особенно остро эта проблема стоит для технологий бессвинцовой пайки. Для обеспечения этих условий для изготовления печатных плат приходится использовать материалы с высокой температурой стеклования. Такие материалы дороже обычных, но получается продукт приемлемого качества и надежности.

7. Исполнение паяльной маски. Конфигурация паяльной маски: точность совмещения с монтажным полем, наличие маски в зазорах между монтажными элементами, отсутствие «наползания» маски на контактные площадки – все это сказывается на качестве пайки. Нагревостойкость и влагостойкость паяльной маски сказывается в последующем на характеристиках устойчивости печатного узла к воздействию внешних факторов.

8. Маркировка. Она должна быть читаемой. Часто ее используют для центрирования компонентов, что не вполне корректно. Тогда к качеству маркировки добавляется точность позиционирования реперных знаков, выполненных маркировкой.

9. Плата должна быть контролепригодной, т.е. иметь дополнительные точки для контактирования зондов (пробников) для внутрисхемного контроля и диагностики качества. Как правило, эти дополнительные элементы уменьшают плотность компоновки на 10...15%.

10. Конфигурация монтажных элементов на плате должна быть приспособлена для групповых методов пайки. Иначе печатный узел будет иметь многочисленные перемычки и непропаи, для обнаружения и исправления которых приходится идти на дополнительные трудозатраты и увеличение себестоимости продукции.

11. Отдельно для монтажа BGA-компонентов (Ball Grid Array) необходимо соблюсти условия пайки без утечки припоя в металлизированные отверстия (рис. 1.1), закрывая их паяльной маской или заполнением металлом (медью по специальной технологии).

Обозначение геометрических характеристик печатных плат показано на рис. 1.2, а численные характеристики плат сегодня и в перспективе приведены в табл. 1.1.

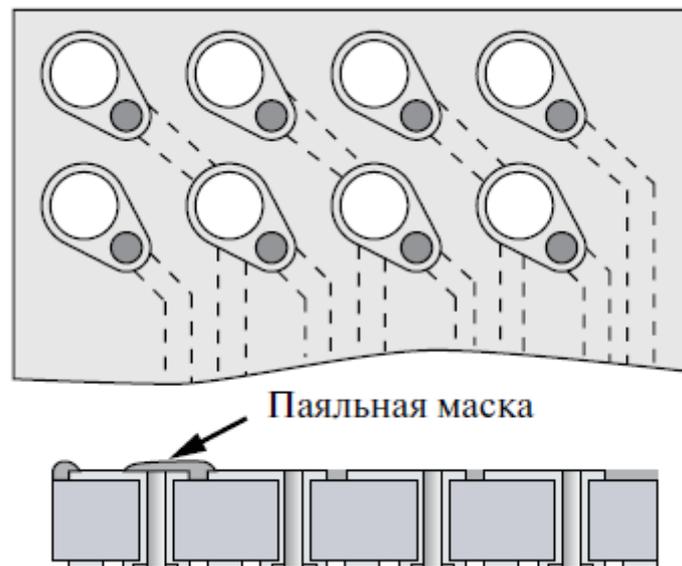


Рис. 1.1. Один из способов предотвращения перетока расплавленного припоя в отверстие

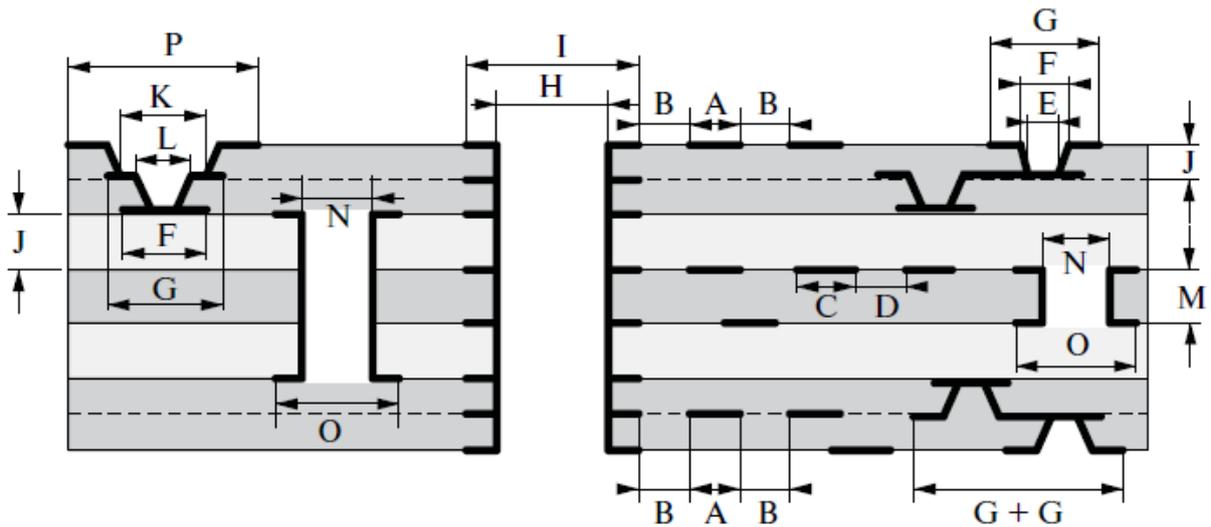


Рис 1.2. Геометрические характеристики монтажного поля печатной платы (МПП)

Табл. 1.1. Численные характеристики монтажного поля печатной платы (МПП)

Символ	Наименование параметра	Минимальный размер, мм		
		Сегодня	Завтра	Послезавтра
A	Ширина проводника на внешней поверхности	0,1	0,075	0,05
B	Зазор на внешней поверхности	0,1	0,085	0,062
C	Ширина проводника на внутреннем слое	0,1	0,075	0,025
D	Зазор на внутреннем слое	0,1	0,085	0,062
Характеристики сквозных отверстий				
H	Диаметр сверления сквозного отверстия	0,25	0,2	0,15
I	Контактные площадки сквозного отверстия	0,48	0,35	0,3
	Отношение толщины платы к диаметру сквозного сверления	10	15	20
Характеристики глухих отверстий				
E	Диаметр глухого отверстия	0,1	0,075	0,025
F	Контактная площадка основания глухого отверстия	0,25	0,2	0,05
G	Контактная площадка входа глухого отверстия	0,3	0,25	0,05
J	Отношение глубины к диаметру глухого отверстия	= 1	= 1	= 1
K	Диаметр верхнего глухого отверстия	0,175	0,15	0,075
L	Диаметр нижнего глухого отверстия	0,1	0,075	0,025
P	Контактная площадка верхнего глухого отверстия	0,375	0,325	0,25
Характеристики слепых (скрытых) отверстий				
M	Диаметр металлизированного слепого отверстия	0,2	0,15	0,1
N	Диаметр сверления слепого отверстия	0,25	0,2	0,15
O	Контактные площадки слепого отверстия	0,48	0,35	0,3

1.2. Материалы монтажных оснований

Чтобы избежать проблем расслоения и коробления оснований печатных плат, их необходимо изготавливать из материалов с большей температурой стеклования (T_g) – около 150°C и выше. Группа материалов типа FR-4 (FR – Flame Resistance (огнеустойчивый). FR-4 – эпоксидная смола, армированная стеклотканью. FR-1 = FR-2 – бумага с фенолоформальдегидной пропиткой. FR-3 – бумага с эпоксидной пропиткой) с $T_g = 125^\circ\text{C}$, обычно используемая при пайке сплавом SnPb, уже не годится для пайки сплавом SnAgCu. Особенно критично поведение материала основания в процессе горячего облуживания HASL. Материалы типа FR-5 (полифункциональная эпоксидная смола ($T_g = 150\dots 160^\circ\text{C}$), армированная высококачественной стеклотканью) и полиимидные платы могут использоваться для бессвинцовой пайки без ограничений. Дешевые материалы типа FR-1, FR-2, FR-3 с $T_g < 130^\circ\text{C}$ уже не годятся для бессвинцовой пайки.

Законы Евросоюза RoHS (Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment) предлагают уйти от галогеновых пламегасителей, входящих в состав связующего материала печатных плат массового применения. Материалы FR-4 с таким связующим имеют T_g в диапазоне $130\dots 150^\circ\text{C}$, что приемлемо для бессвинцовой пайки. Но стоимость таких материалов более чем на 30% выше. Для удешевления в состав армирующих компонентов вводят целлюлозную (CEM-1) или стеклянную (CEM-3) бумагу (CEM – Composite Epoxy Material). Такие материалы мягче для сверления, при их использовании стенки отверстий ровнее, а расход сверл меньше, что создает им некоторые преимущества перед FR-4.

1.3. Металлизация отверстий

Пластичность медных осадков должна соотноситься с температурным расширением основания плат по оси Z. Оно будет больше при более высоких температурах пайки бессвинцовыми припоями. Чтобы устоять перед расширением основания и гарантировать большую прочность и большую пластичность медных осадков, необходимо более жестко управлять процессом металлизации сквозных отверстий. Для обеспечения прогрева сквозных монтажных отверстий до более высоких температур, свойственных бессвинцовым пайкам, необходимо обеспечить соответствующую теплопроводность металлизации за счет увеличения ее толщины. Это вынуждает пересмотреть нормы требований к технологии металлизации отверстий печатных плат.

1.4. Рекомендации по конструированию печатных плат применительно к автоматизированной сборке

1. При проектировании печатной платы (ПП) необходимо руководствоваться требованиями российских стандартов по конструированию ПП (в частности, ГОСТ 23751) и стандартов Международной электротехнической комиссии (МЭК) по конструированию печатных плат с применением технологии поверхностного монтажа.

2. Наличие защитной маски на ПП обязательно.

3. Величина деформации печатной платы не должна превышать требований ГОСТ 23752.

4. ПП должна иметь не менее двух фиксирующих отверстий диаметром $2,7+0,06$ мм или $3,0+0,06$ на расстоянии $5,0\dots 5,5$ мм от края длинной стороны и не более 20 мм от края коротких сторон для перемещения платы для позиционирования (рис. 1.3). Фиксирующие отверстия ПП, необходимые для закрепления на координатном или рабочем столе технологического оборудования, выполняют по качеству Н9. При автоматизированной сборке предельные отклонения на межцентровые расстояния между фиксирующими отверстиями устанавливаются не более $\pm 0,05$ мм, между фиксирующими отверстиями и контактными площадками – не более $\pm 0,1$ мм. При этом вокруг этих отверстий должна оставаться свободная зона диаметром не менее 10 мм.

5. Оптимальный зазор между выводом компонента и стенкой монтажного отверстия должен составлять $0,2\dots 0,3$ мм. При меньшем расстоянии припой плохо затекает в отверстие, появляются пустоты и непропаи. С увеличением зазора возрастает расход припоя, появляются усадочные раковины в припое. При выборе диаметра отверстия необходимо учитывать толщину слоев основной металлизации и финишного покрытия.

6. Предельные отклонения расстояний между центрами монтажных отверстий и базового отверстия для автоматизированной сборки без применения средств технического зрения не должны превышать $\pm 0,05$ мм, между осями контактных площадок $\pm 0,1$ мм.

7. На печатной плате с SMD-компонентами необходимо иметь реперные знаки, выполняющие роль элементов базирования при установке компонентов. В качестве реперного знака рекомендуется кружок металлизации с покрытием, диаметром $1,0\dots 1,6$ мм, вокруг которого должно быть свободное от маски кольцо шириной не менее 0,3 мм. Вокруг реперного знака на расстоянии трех его радиусов не должно быть элементов проводящего рисунка. Необходимо по 2 реперных знака на каждом краю платы в удаленных углах (например: левый нижний, правый верхний) на расстоянии не менее 5 мм от края ПП (рис. 1.3).

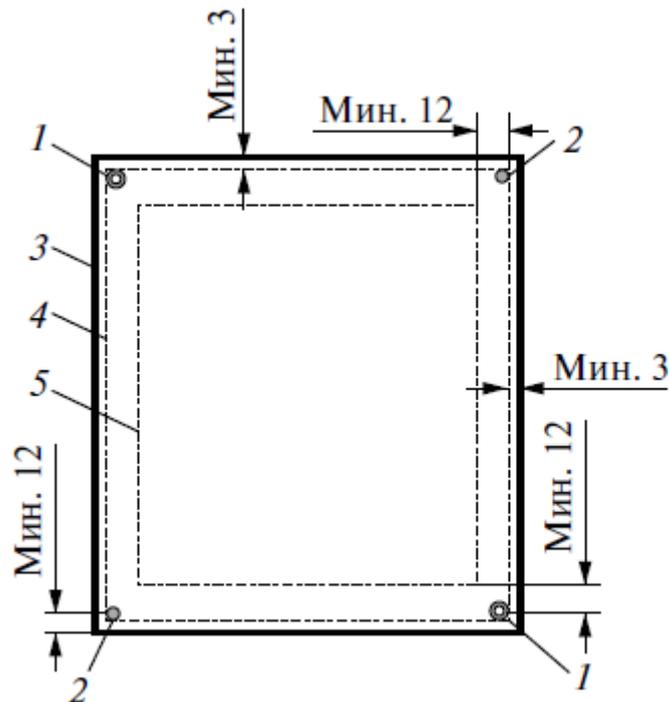


Рис. 1.3. Размещение реперных знаков на заготовке ПП: 1 – базовые отверстия; 2 – реперные знаки; 3 – периметр заготовки ПП; 4 – периметр мультиплицированной заготовки (панели), поступающей на сборку; 5 – рабочее поле заготовки, на котором размещаются платы

8. Платы малого размера рекомендуется выполнять в виде мультиплицированной заготовки. Мультиплицированная заготовка должна иметь базовые отверстия на технологическом поле. Каждая из плат в мультиплицированной заготовке должна иметь свои реперные знаки. Габариты мультиплицированных заготовок (панелей) рекомендуется выбирать из стандартного ряда размеров.

9. При размещении SMD-компонентов на ПП следует руководствоваться требованиями ОСТ 4.42.02_93, п.6. Рекомендуется при установке компонентов в chip-корпусах на стороне пайки располагать их продольной осью вдоль короткой стороны ПП (направлению пайки волной), SMD-компоненты в корпусах типа SO целесообразно располагать стороной корпуса с выводами вдоль направления пайки волной; за последней парой выводов должны быть сделаны вспомогательные (незадействованные) площадки для предотвращения образования спаек.

9.1. Минимальное расстояние между контактными площадками соседних SMD-компонентов должно быть не менее 1 мм, а между SMD-компонентами и компонентами со штырьковыми выводами – не менее 1,5 мм.

9.2. Переходные отверстия должны находиться вне контактных площадок для монтажа выводов SMD-компонентов. Переходные отверстия

диаметром 0,6 мм с открытыми контактными площадками должны находиться вне проекции корпусов типа CHIP, MELF, SOT, SOIC на ПП.

10. Не рекомендуется располагать рядом компоненты, значительно отличающиеся по высоте, т.к. при пайке оплавлением паяльной пасты «тепловая» тень от больших компонентов ухудшает пайку низких компонентов.

11. Chip-компоненты рекомендуется располагать не ближе 3 мм от выводов корпусов микросхем.

12. Под компонентами в неизолированных корпусах, устанавливаемыми вплотную на плату, не должно быть проводников, так как применение изолирующих прокладок усложняет и удорожает процесс сборки.

13. Каждый типоразмер SMD-компонента должен иметь свою конфигурацию монтажного поля и форму контактных площадок (целесообразно руководствоваться стандартами IPC-CM-770E «Surface Mount Design and Land Pattern Standard» и IPC-7351 «Generic Requirements for Surface Mount Design and Land Pattern Standards» или соответствующими им стандартами МЭК. Для обеспечения возможности использования микросхем в различных корпусах рекомендуется использование универсального монтажного поля с возможностью замены корпусов от различных поставщиков компонентов.

14. Контактные площадки вокруг отверстий и площадки для SMD-компонентов должны соединяться между собой проводником номинальной ширины, перекрытым защитной маской. Слияние этих площадок недопустимо (рис. 1.4).

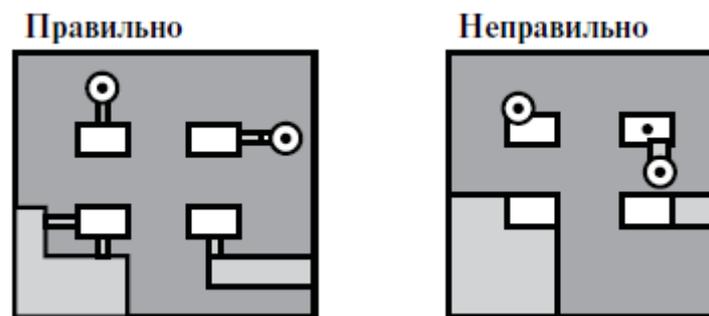


Рис. 1.4. Контактные площадки отверстий и контактные площадки для монтажа компонентов должны соединяться (при необходимости) проводниками номинальной ширины (правильно) и не выполняться общим массивом (не сливаться), что было бы неправильно

15. Размещение контактных площадок непосредственно в полигонах недопустимо (большой теплоотвод делает невозможной качественную пайку), они должны быть отделены от полигона тепловыми зазорами и электрически соединяться с ним только проводником номинальной ширины. Выполнение полигонов в виде сетки уменьшает теплоемкость и короб-

ление платы во время пайки. В случае прохождения монтажного отверстия сквозь несколько полигонов в разных слоях необходимо делать в них увеличенные тепловые зазоры для уменьшения теплоемкости, в противном случае при пайке охлаждающийся припой не протекает сквозь металлизированное отверстие со стороны пайки на противоположную сторону.

16. Расстояние между контактной площадкой монтажного отверстия и контактной площадкой для chip или MELF-компонентов, перекрытое паяльной маской, должно быть не менее половины высоты компонента, но более 0,5 мм.

17. Минимальная ширина контактной площадки при шаге выводов 0,5 мм должна составлять 0,25 мм.

18. Рекомендуется нанесение защитной маски между контактными площадками под компоненты с шагом выводов до 0,5 мм включительно.

19. Неиспользуемые контактные площадки для микросхем в корпусах типа QFP, PLCC, SO рекомендуется снабжать аппендиксом в виде короткого печатного проводника, заходящим под защитную маску. Это позволяет предотвращать отслоение площадок при ремонте.

20. Соединения между соседними выводами микросхем должны выполняться за пределами монтажного поля, так как после пайки перемычка между соседними площадками может выглядеть как спайка. Соединительный проводник должен подходить соосно к торцу контактной площадки и шириной не более ширины площадки (рис. 1.5).

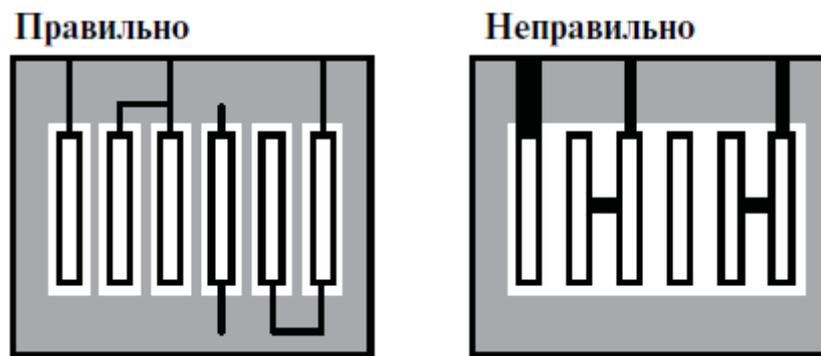


Рис. 1.5. Правила соединений соседних контактных площадок

21. Для точной установки BGA-компонентов и микросхем с шагом менее 0,625 мм рекомендуется делать два локальных реперных знака, расположенных по диагонали на периметре монтажного поля микросхем.

22. Для обеспечения качества пайки chip-компонентов в корпусах типа А, Е и т.п. (танталовые конденсаторы, диоды, резисторы) волной припоя (сторона пайки) рекомендуется удлинение контактной площадки за пределы корпуса (с торцов) на 0,2 мм больше высоты компонента (рис. 1.6).

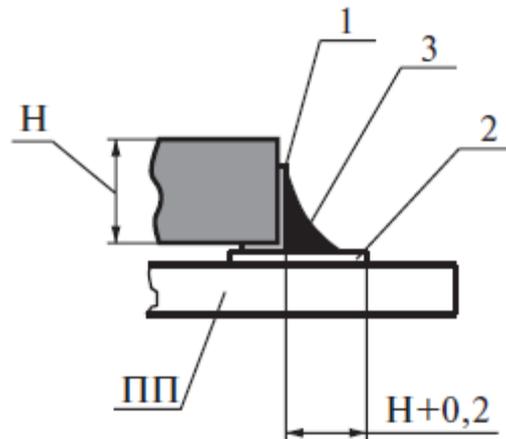


Рис. 1.6. Выбег контактной площадки из-под безвыводных компонентов

23. Рекомендуется при разработке проекта электронного модуля максимально заменять выводные компоненты на SMD-компоненты.

24. Следует сокращать количество типонаминалов корпусов компонентов в пределах одного проекта платы и изделия в целом, так как это сокращает время на подготовку производства и сборку. Рекомендуется заменять уникальные типонаминалы компонентов на 2...3 обычных, соединяя их параллельно или последовательно.

25. Нежелательно без необходимости применять chip-компоненты в корпусах размером менее 0805 на печатных платах с оплавлением или HASL-покрытием.

26. Не рекомендуется применение в пределах одной платы разных типоразмеров корпусов для одного номинала, так как это усложняет процесс монтажа и увеличивает вероятность ошибки (например, если на плате имеется значительное количество компонентов chip-резисторов с 5% отклонением от номинала в 1206-корпусах при наличии таких же компонентов в 0805-корпусах следует заменить корпус 0805 на 1206).

27. Все компоненты одного типонаминала рекомендуется располагать на одной стороне ПП.

28. При смешанном монтаже установка выводных компонентов должна соответствовать ОСТ 45.010.030_92 «Электронные модули первого уровня РЭС. Установка изделий электронной техники на печатные платы. Технические требования. Конструкции и размеры».

29. При установке на ПП разъемов типа Press-Fit (Z-pack, Hard metric) необходимо предусмотреть на стороне выводов зону для опоры инструмента, свободную от компонентов и паек.

30. Если платы имеют небольшие размеры, целесообразно заказывать мультиплицированную заготовку, спроектированную по нормам панели для группового монтажа. Тогда для отделения одной платы от другой необходимо предусмотреть фрезеровку их контура с легко переламываемыми переключками или скрайбирование (надрезы) контура для удобства последующего отделения плат от панели, например, роликовыми ножни-

цами. Можно предусмотреть и то и другое, если контуры плат отличаются от прямых линий.

1.5. Вопросы для самопроверки

1. Какие требования предъявляются к печатным платам?
2. Какие геометрические характеристики печатных плат вы знаете?
3. Какие материалы монтажных оснований вы знаете?
4. Назовите основные рекомендации по конструированию печатных плат применительно к автоматизированной сборке.

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2

Изучение основ монтажной пайки

Цель работы. Изучить технологические этапы процесса волновой пайки, а также особенности инфракрасной пайки.

2.1. Общие вопросы монтажной пайки

Монтажная (электромонтажная) пайка представляет собой процесс механического и электрического соединения металлических деталей с нагревом ниже температуры их расплавления путем смачивания и заполнения зазора между ними расплавленным припоем и сцепления за счет отверждения паяного шва.

Технологические процессы образования межсоединений стимулируются нагревом (примерно выше 100 °С). Они протекают при плавлении или диффузии в твердой фазе и могут сопровождаться химическими реакциями. Монтажные соединения образуются в процессах пайки и сварки.

По способу воздействия на объект производства технологические процессы образования монтажных соединений разделяют на изотропные и локальные.

Изотропные – процессы с температурным воздействием на все изделие или поверхность. Локальные – процессы с избирательным воздействием на ограниченной площади (в «точке»).

К изотропным относят процессы, выполняемые в однородной среде, например в печах с заданной газовой средой, в ваннах для пайки.

К локальным – точечную сварку и пайку, лазерную обработку.

В процессе пайки развиваются реакции на границах жидкого, а потом и затвердевшего, припоя и поверхностей спаиваемых деталей. Течение твердофазных реакций определяется двумя механизмами: диффузией и процессами на границе фаз: жидкой (расплавленный припой) и твердой (соединяемые детали).

Различают селективный нагрев монтажных точек и групповой.

При селективной пайке нагрев ведется от точки к точке, так что все монтажное изделие и монтируемые элементы при этом остаются холодными. К селективной пайке относятся пайки нагретым инструментом: паяльником, нагретым электродом, ИК-, световым или лазерным лучами.

Процесс пайки состоит из флюсования места пайки, нагрева до расплавления и смачивания его припоем, фиксации вывода элемента относительно контактной площадки и остывании в фиксированном состоянии. Только ручной паяльник совмещает в себе одну из этих функций. Но паяльник – ручной инструмент, управляемый человеком, поэтому процесс пайки паяльником с трудом поддается управлению. Остальные виды селективной пайки поддаются разделению операций: нанесение флюса, припоя, при-

давливание для соприкосновения соединяемых поверхностей, нагрев соединяемых элементов до полного смачивания, остывание.

Флюсование, как правило, ведут любым групповым или селективным (с помощью дозатора) способом.

Если для качественной пайки необходимо дозированное нанесение припоя, его осуществляют либо «жирным» лужением соединяемых поверхностей, либо селективным нанесением паст припоя. Пасту припоя – вязкую смесь флюса с тонко диспергированным припоем – наносят на монтажные элементы печатных плат либо методом трафаретной печати, либо селективно манипулятором с дозатором – диспенсером. Точное дозирование нанесения пасты необходимо для образования галтели припоя правильной формы, соответствующей размеру (объему) паяного узла с образованием скелетной пайки. Передозировка пасты приводит к образованию заливной (неразрешенной) пайки. Недостаточная доза не позволяет полностью сформировать качественный паяный узел.

При импульсной пайке (одной из разновидностей селективной пайки) тепловая энергия поступает в зону пайки путем кондуктивной теплопередачи от поверхности специального электрода, нагреваемого импульсом тока.

Цикл пайки состоит из:

- придавливания холодным электродом группы выводов к монтажным элементам печатной платы;
- включения импульса тока для нагрева электрода до расплавления заранее нанесенного припоя;
- выдержки для образования сплавного соединения;
- выключения тока и остывания электрода и пайки;
- подъема электрода (снятия давления электрода на выводы компонента);
- перехода инструмента в новую позицию.

Такая последовательность манипуляций при импульсной пайке позволяет жестко регламентировать режимы пайки при недостаточной определенности положения выводов компонентов над поверхностью монтажных площадок.

При лучевых методах селективной пайки прижим выводов к монтажным элементам должен обеспечиваться точной формовкой выводов и строгой дозировкой нанесения припоя перед пайкой. Фиксация прижима выводов осуществляется приклеиванием корпуса компонента к плате.

Групповые методы нагрева при пайке предполагают общий нагрев всего электронного узла до температур пайки или односторонний нагрев поверхности, на которой расплавляют припой для образования паяных галтелей: пайка волной припоя, ИК-нагрев, конвекционный нагрев в печи в среде инертного газа, конденсационный нагрев подготовленного узла в парах высококипящей жидкости, погружение в горячую жидкость.

Чтобы предотвратить термоудар, перед основной зоной пайки или перед вводом изделия в нагретую среду его предварительно и постепенно подогревают. Этим существенно снимаются температурные градиенты и вызываемые ими значительные термомеханические напряжения, что существенно поднимает надежность электронных узлов.

Использование групповых методов пайки сопровождается интенсивным нагревом монтажной подложки. В качестве материалов подложек в подавляющем большинстве случаев используют композиционные материалы: стеклоэпоксидные композиты, гетинаксы, полиэфирные композиты.

Все они имеют макрокапиллярность и уже только за счет этого гигроскопичны. Гетинаксы, например, поглощают до равновесного состояния 3% влаги. При быстром нагреве до температур паяк влага интенсивно (за несколько секунд) испаряется, пары за короткое время пайки не успевают выйти из объема нагрева и создают внутреннее давление, способное разорвать или расслоить изделие. Для предотвращения «термического взрыва» перед групповой пайкой необходимо предусматривать глубокую сушку плат и последующее хранение высушенного задела в сухом боксе или вакуумной упаковке.

2.2. Пайка волной припоя

Пайка волной припоя в наибольшей степени пригодна для пайки штыревых компонентов. Подавляющее большинство печатных плат с металлизированными монтажными отверстиями монтируются посредством волновой пайки (рис. 2.1).

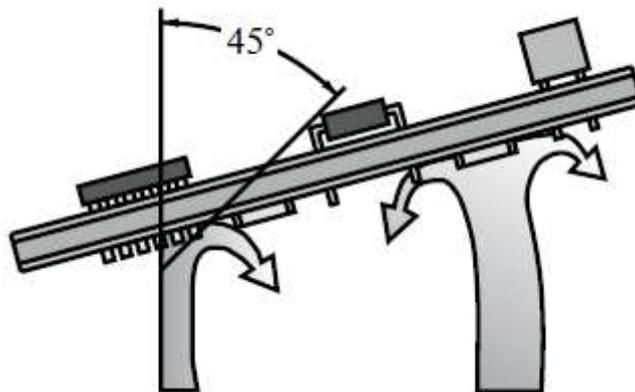


Рис. 2.1. Схема пайки волной припоя

Принцип метода состоит в том, что плата прямолинейно проводится через гребень волны припоя. Волна припоя остается свободной от окислов и шлаков благодаря постоянному обновлению поверхности.

Технологические этапы процесса волновой пайки:

- входной контроль собранного печатного узла;

- вставление платы в технологическую рамку, выпрямляющую ее в плоскость и удерживающую ее в этом состоянии до остывания;
- фиксация технологической рамки с платой на конвейере;
- флюсование в блоке флюсования установки;
- первая зона предварительного подогрева – сушка флюса;
- вторая зона предварительного подогрева – подготовка платы к термоудару расплавленным припоем;
- пайка волной припоя;
- съем платы в технологической рамке с транспортера конвейера;
- охлаждение платы в технологической рамке;
- изъятие платы из технологической рамки;
- передача платы на отмывку от технологических загрязнений.

Флюс, как правило, наносится пеной. Это обеспечивает тонкий и равномерный слой флюса. Флюс вспенивается воздухом, нагнетаемым через капиллярный фильтр. Тонкая пленка флюса (3...4 мкм) достаточна для качественного флюсования, успевает высохнуть в зоне предварительного нагрева, а при последующей отмывке меньше загрязняет моющие растворы.

После флюсования плата подогревается в первой зоне и продувается горячим воздухом для удаления растворителя флюса. При перемещении во вторую зону подогрева плата проходит над нагретой плитой или инфракрасными излучателями. Это подготавливает восстанавливающее действие флюса и смягчает термоудар расплавленным припоем волны.

При соприкосновении металлических элементов платы с припоем флюс вместе с продуктами реакции вытесняется припоем, и он смачивает и заполняет зазоры паяных узлов.

Пайка производится при температуре 240...270 °С. При скорости транспортирования 0,5...3 м/мин время пайки составляет 1...7 с. Производительность процесса – до 1000 шт./ч.

Для торможения окисления расплавленного припоя его поверхность защищают нагревостойким маслом (арахисовым или пальмовым). Однако после пайки приходится использовать большие объемы растворителей, чтобы смыть с платы остатки масла. В последнее время масло стараются не использовать. Его заменяют специальными раскислителями, добавляемыми в припой.

Волна, ее форма и динамические характеристики являются наиболее важными параметрами оборудования для пайки. С помощью сопла можно менять форму волны. Направление и скорость движения потока припоя, достигающего платы, также могут варьироваться, но они должны быть одинаковы по всей ширине волны. Угол наклона транспортера для плат тоже регулируется. Некоторые установки для пайки оборудуются за участком прохождения волны припоя горячим воздушным ножом, который обеспечивает уменьшение количества перемычек припоя. Узкий поток

нагретого воздуха, движущийся с высокой скоростью, уносит с собой излишки припоя, тем самым разрушая перемычки и способствуя удалению остатков припоя.

Необходимо избегать резкого охлаждения паяных узлов, чтобы не возникло термомеханических напряжений, источниками которых является значительная разница в линейном расширении материалов печатной платы и металлических компонентов паяного узла.

При пайке волной припоя возникло множество проблем, связанных с конструкцией плат и с особенностями процесса пайки: непропаи и отсутствие галтелей припоя из-за эффекта затенения выводов компонента другими компонентами, преграждающими доступ волны припоя к соответствующим контактным площадкам. Совершенствование конструкций плат оказалось недостаточным для обеспечения устойчивого качества пайки. Потребовалось ввести вторую волну припоя. Первая волна исходит из сопла под большим давлением. Однако после нее все же остаются перемычки припоя. Вторая волна разрушает эти перемычки. Для этого ее поток делают более пологой ламинарной волной с малой скоростью истечения (рис. 2.2).

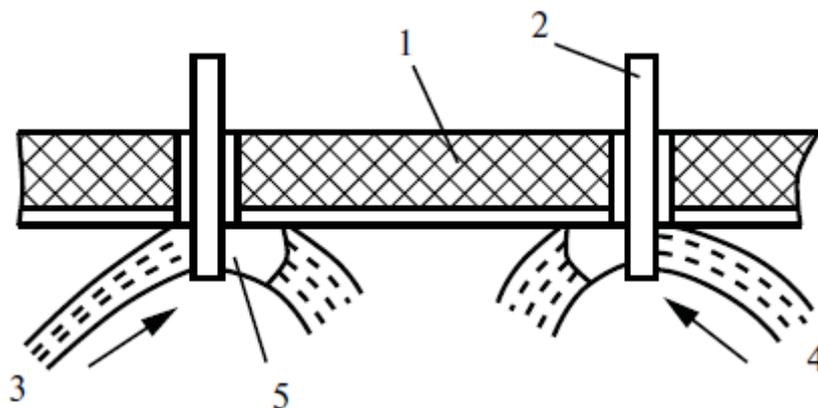


Рис. 2.2. Образование и устранение теней при пайке волной припоя:
1 – плата с монтажными отверстиями; 2 – штыревой вывод компонента;
3 – попутная струя волны; 4 – встречная струя волны; 5 – затенение

Для обеспечения эффективности пайки все параметры каждой волны должны быть регулируемыми. Поэтому установки для пайки двойной волной должны иметь отдельные насосы, сопла, а также блоки управления для каждой волны. Установки для пайки двойной волной рекомендуется приобретать вместе с воздушным ножом как дополнительным средством для разрушения перемычек из припоя.

Пайка двойной волной припоя применяется для коммутационных плат с пайкой в отверстия выводов компонентов на лицевой стороне и поверхностно монтируемыми компонентами (чипами и транзисторами) на обратной стороне.

Некоторые компоненты на обратной стороне омываются горячим припоем и могут быть повреждены во время пайки. Поэтому необходимы некоторые меры предосторожности: по крайней мере, применять поверхностно монтируемые компоненты, нечувствительные к тепловому воздействию.

Хорошо разнесенные, не загораживающие друг друга компоненты способствуют доставке припоя к каждой галтели каждого компонента. Но если для этого разносить компоненты, снижается плотность монтажа. При высокой плотности монтажа, которую позволяет реализовать поверхностный монтаж, пайка волной не обеспечивает устойчивость пропая поверхностно монтируемых компонентов, по крайней мере – с четырехсторонней разводкой выводов. Чтобы уменьшить эффект затенения, такие компоненты следует размещать перпендикулярно направлению движения волны. Трудно паять волной припоя транзисторы в корпусах типа 50Т-89, поскольку они имеют довольно массивный центральный вывод, что затрудняет его равномерное смачивание и растекание припоя по всей поверхности вывода.

В итоге можно сформулировать ограничения при использовании пайки волной припоя, обусловленные ее недостатками:

- мощный термоудар для платы и поверхностно-монтируемых компонентов;
- наличие «теневого» эффекта при пайке поверхностно-монтируемых компонентов (непропай);
- большое количество дефектов паяк при малом расстоянии между монтажными элементами.

2.3. Инфракрасная пайка

Для ИК-нагрева используются специальные лампы накаливания и рефлекторы, как правило, эллиптические (рис. 2.3).

Количество тепла регулируется мощностью излучения (напряжением питания ламп) и скоростью движения транспортера.

Под ИК-излучением понимают широкую область спектра между видимым светом и микроволновым диапазоном. Поэтому нельзя ограничиваться обозначением «ИК-нагрев». Непременнo нужно говорить о конкретном диапазоне ИК-излучателей:

- излучение с длиной волны 0,7...1,5 мкм – ближняя инфракрасная область спектра;
- 1,5...6 мкм – средняя ИК-область;
- 6...1000 мкм – дальняя область.

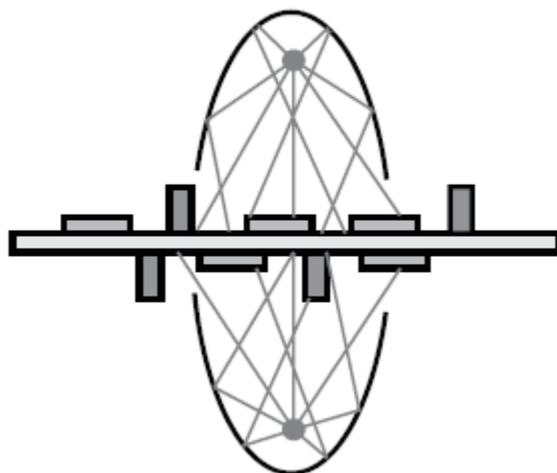


Рис. 2.3. Схема ИК-нагрева

Глубина проникновения ИК-излучения соизмерима с его длиной волны. Известно, что чем меньше температура нагревателя, тем больше длина волны его излучения и больше глубина проникновения излучения вглубь материала. ИК-нагрев в ближней области спектра создает преимущественно поверхностный нагрев с неглубоким проникновением вглубь, поэтому он часто используется для оплавления покрытий плат. Но для пайки оплавлением пасты для сушки клея эта ИК-область неприемлема, поскольку при ее использовании в первую очередь нагревается поверхность, за счет чего образуется поверхностная пленка (рис. 2.4). При продолжающемся нагреве вскипающие летучие взрывают эту пленку, вызывая разбрызгивание продуктов объема с образованием шариков припоя (рис. 2.4, а). Поэтому в некоторых установках для пайки с ИК-нагревом вместо ИК-ламп применяются панельные излучатели. В этом случае излучающие поверхности имеют меньшую температуру, а излучение имеет намного большую длину волны, чем излучение традиционных ламповых источников. Меньшую плотность энергии излучения таких источников компенсируют их большей площадью (панели). Создаваемое ими ИК-излучение обеспечивает глубокое проникновение энергии в объем нагреваемых поверхностей и равномерный прогрев паяльных паст с равномерным испарением летучих. Частицы припоя в объеме паст равномерно поглощают энергию излучения и плавятся (рис. 2.4, б). Таким образом, механизм флюсования и плавления припоя работает по всему объему и завершается образованием галтели припоя. Все это обусловило применение средней области ИК-спектра для пайки поверхностно монтируемых компонентов. Дальняя область ИК-спектра не может использоваться для пайки, поскольку не развивает нужных для расплавления припоя температур, но эффективно применяется для удаления летучих (сушки) и отверждения клеев.

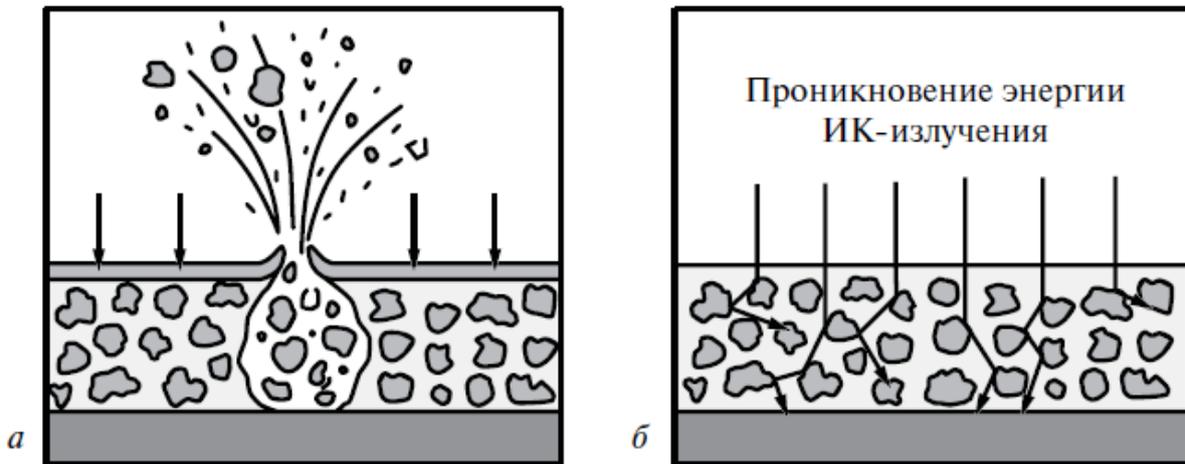


Рис. 2.4. Преимущества использования средне- и длинноволнового ИК-нагрева: *а* – последствия образования поверхностной пленки при нагреве в ближней области ИК-спектра; *б* – равномерное проникновение энергии излучения в объем паст при нагреве в средней и длинной областях ИК-спектра

Панельные излучатели обеспечивают намного меньшую скорость нагрева, чем традиционные источники ИК-излучения, и тем самым предотвращают жесткий термоудар и большой перепад температур от поверхности вглубь. Поэтому при их использовании может не потребоваться технологическая среда из инертного газа (обычно азота).

Простые установки ИК-оплавления использовали для нагрева лампы-вые ИК-излучатели с вольфрамовыми нитями накаливания с температурой их нагрева $700\text{...}800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поскольку температура пайки составляет $220\text{...}230\text{ }^{\circ}\text{C}$, режим нагрева поверхности значительно отличался от равновесного, при этом возникали перегретые участки, обусловленные в том числе различной степенью поглощения ИК-спектра различными элементами монтажа. Улучшение характеристик установок было получено переходом на излучатели, работающие в средневолновом ИК-диапазоне ($3\text{...}10\text{ }\mu\text{м}$). Конструктивно такие излучатели представляют собой керамические панели больших размеров с температурой излучающей поверхности $280\text{...}320\text{ }^{\circ}\text{C}$. В таких устройствах до 60% тепловой энергии доставляется к объекту за счет естественной конвекции, 40% – за счет поглощения средневолнового ИК-излучения. Такие комбинированные установки производят нагрев объекта в режиме, близком к равновесному, и в настоящее время широко используются при поверхностном монтаже.

Схема типичной конструкции установки ИК-оплавления приведена на рис. 2.5.

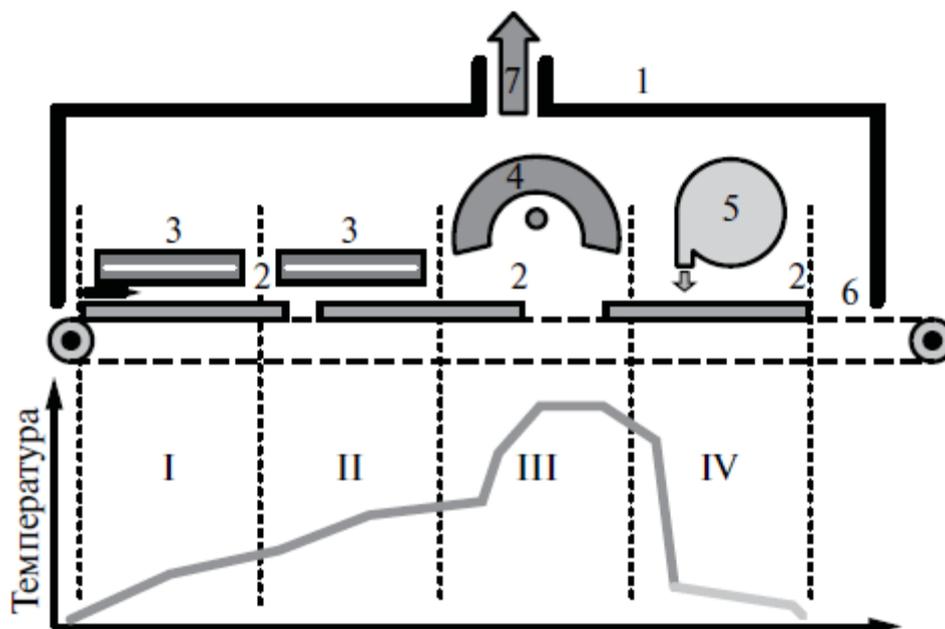


Рис. 2.5. Схема установки для ИК-пайки

Установка состоит из колпака 1, внутри которого расположено несколько зон нагрева, в каждой из которых поддерживается заданный тепловой режим. В первой и второй зонах производят постепенный предварительный нагрев изделия 2 с помощью плоских нагревателей 3. Пайку производят в третьей зоне быстрым нагревом объекта выше температуры плавления припоя с помощью кварцевых ИК-ламп 4, затем объект охлаждают с помощью устройства 5. Платы транспортируются ленточным (обычно сетка из нержавеющей стали) конвейером 6. Вытяжка паров испарений производится через окно 7. Оно же используется для регулировки температуры в подколпачном пространстве. Режимы работы нагревателя и скорость конвейера регулируются с помощью микропроцессорной системы, температурный профиль вдоль установки отображается в графической и цифровой форме на экране дисплея. Характеристики температурного профиля, т.е. значения температур в каждой зоне, можно изменять в широких пределах, также возможно иметь библиотеку типовых режимов оплавления для печатных плат различных типоразмеров.

Недостатки ИК-пайки:

- поглощение энергии излучения компонентами и платой зависит от поглощающей способности материалов, из которых они изготовлены. Поэтому нагрев элементов неравномерен в пределах монтируемого изделия из-за их различающейся спектральной чувствительности;

- не все производители компонентов разрешают нагрев компонентов до температур пайки. Но доля таких производителей постоянно уменьшается, поскольку использование их компонентов увеличивает трудоемкость сборочно-монтажных работ. При переходе к бессвинцовым технологиям предстоит заново решать эту проблему;

- не все поверхностно-монтируемые компоненты поддаются ИК-пайке. Например, компоненты с J -выводами недоступны для ИК-нагрева, чтобы нагреть пайки под корпусом компонента;
- ИК-пайка пригодна только для поверхностного монтажа. Компоненты с выводами для пайки в отверстия приходится монтировать отдельно;
- неравномерное спектральное поглощение ИК-энергии различными поверхностями и, как следствие, неравномерный нагрев.

2.4. Вопросы для самопроверки

1. Назовите технологические этапы процесса волновой пайки.
2. Назовите проблемы, возникающие в процессе пайки волной припоя.
3. Сформулируйте ограничения при использовании пайки волной припоя.
4. С чем заключаются преимущества использования средне- и длинноволнового ИК-нагрева?
5. Объясните работу типичной конструкции установки ИК-оплавления.
6. В чем заключаются недостатки ИК-пайки?

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3

Изучение основ монтажной микросварки

Цель работы. Изучить механизм образования сварного шва при использовании термокомпрессионной, электродуговой и лучевой сварки.

3.1. Место микросварки в производстве электроники

Сварка – технологический процесс соединения деталей в результате действия межатомных сил, которые образуются при местном сплавлении и совместном пластическом деформировании свариваемых поверхностей. Микросварка (microwelding) – набор способов межсоединений с очень малой зоной сплавления или без расплавления, так чтобы сварной шов был соизмерим с микроскопическими размерами соединяемых деталей: выводов кристаллов микросхем с внешними выводами корпусов, выводов микросхем с контактными площадками на монтажных подложках. На рис. 3.1 показан пример таких межсоединений, чтобы представить место микросварки в современной электронике.

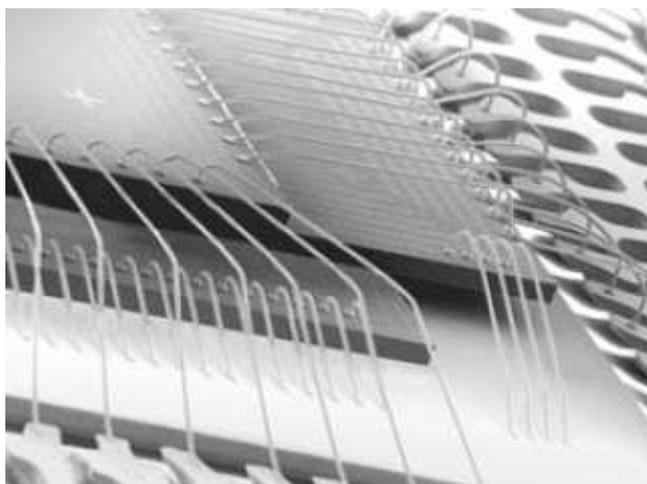


Рис. 3.1. Иллюстрация микроскопических размеров межсоединений кристаллов микросхем с подложкой

Классификация сварок:

- сварка плавлением: дуговая, плазменная, электрошлаковая, газовая, лучевая и др.;
- сварка давлением (деформационная сварка): горновая, холодная, ультразвуковая, трением, взрывом и др.

По видам энергии, используемой для нагрева свариваемых поверхностей, различают:

- электрическую: дуговая, контактная, электрошлаковая, плазменная, индукционная и др.;

- механическую: трением, холодная, ультразвуковая и др.;
- химическую: газовая, термитная;
- лучевую: фотонная, электронная, лазерная.

Особый вид сварки – диффузионная сварка (холодная сварка), основанная на способности физически чистых поверхностей к «сцеплению» благодаря атомным связям. Для этого требуется некоторое сжимающее усилие, достаточное (за счет деформации) для сближения поверхностей на расстояние радиуса действия межатомных сил. Диффузионный процесс особенно полно протекает в вакууме при температуре ниже температуры плавления наиболее легкоплавкого из соединяемых материалов, то есть в твердом их состоянии.

У современных изделий электроники размеры монтажных элементов настолько малы, что образование зоны плавления, которая наблюдается в конструкционной сварке, привело бы к их разрушению. Чтобы предотвратить разрушение монтажных элементов, микросварку проводят методами квазисплавления, когда соединение металлов проходит без образования большого литого ядра, преимущественно за счет процессов термодиффузии.

Второе принципиальное отличие монтажной микросварки от других методов соединений (в первую очередь от конструкционной) состоит в необходимости предотвращения нагрева электронных компонентов, особенно микросхем. Это тем более важно в связи с увеличением количества выводов микросхем и соответствующего уменьшения их размеров, так что зона нагрева при пайке и сварке находится в непосредственной близости к корпусу высокоинтегрированного компонента.

Третья особенность микросварки состоит в ее преимуществе перед пайкой: микросварка позволяет монтировать компоненты с очень малым зазором. Шаг выводов микросхем порядка 0,4 мм сегодня становится обычным, а завтра ожидается 0,3 мм. Зазор между такими выводами становится настолько малым (100...150 мкм), что при обычной пайке он может быть залит припоем, что приведет к КЗ. В микроэлектронике такие зазоры – обычное явление, этим обусловлено широкое использование в микроэлектронном производстве методов микросварки. Повсеместное распространение методов микросварки в производстве электроники затруднено из-за присущих ей серьезных недостатков, которые заставляют совершенствовать технологию пайки, а сварку применять в исключительных случаях.

Самый существенный недостаток микросварки состоит в затруднительности ремонта сварного соединения. Его можно только разрушить, в то время как демонтаж пайки выполняется повторным нагревом.

Зависимость режимов пайки от теплофизических характеристик и конструкции соединяемых элементов делает ее технологию неустойчивой (плохо управляемой), а значит и менее надежной. Сварку нельзя использо-

вать для присоединения компонентов с лужеными выводами или легкоплавкими покрытиями под пайку: слой полуды будет расплавлен раньше основного металла, под действием электро- и термодинамических сил в зоне сварки произойдет разбрызгивание припоя и загрязнение сварного шва продуктами его сгорания.

Но преимущество монтажной микросварки состоит в том, что она создает неразрушающиеся при высокой температуре соединения. В конструкциях бортовой аппаратуры такие требования возникают при создании микросборок и гибридных интегральных микросхем, и удовлетворить их может только микросварка. Освоение технологий СОВ – кристалл на плате и МСМ – многокристальные модули связано с использованием микросварки как основного метода формирования межсоединений между кристаллами микросхем и монтажной подложкой.

3.2. Механизм образования сварного шва

Микросварку производят либо в жидкой фазе (сварка плавлением), либо в твердой фазе (сварка давлением и термокомпрессией). Возможность образования при плавлении хрупких интерметаллических соединений и ухудшение за счет этого адгезии тонких металлических пленок к подложке ограничивает применение микросварок с использованием нагрева до расплавления.

Ввиду малых толщин соединяемых элементов, сварка в основном выполняется без образования расплава или в режиме квазисплавления. Применение микросварок без плавления обусловлено также большей возможностью управления параметрами процесса, его механизации и автоматизации, высоким качеством соединения. При микросварке давлением формы и размеры сварной точки ограничены отпечатком рабочей частью инструмента.

Все методы монтажной микросварки отличаются лишь способами генерации и введения тепловой энергии в зону соединения:

- при термокомпрессионной сварке тепло поступает от нагретого инструмента (кондуктивная теплопередача);
- при контактной сварке – от тока нагрузки непосредственно в свариваемых элементах;
- при ультразвуковой – от трения на границе соединяемых поверхностей;
- при газовой сварке – от пламени;
- при лучевой – от поглощения энергии светового луча.

Отсутствие зоны плавления при выполнении монтажной микросварки компенсируется обязательным присутствием процесса пластической деформации зоны соединения. Для этого процесс микросварки организуется так, чтобы нагрев сопровождался приложением давления.

Сварка в твердой фазе (сварка квазисплавлением) протекает в три стадии:

- 1 – физический контакт поверхностей;
- 2 – активация поверхностей за счет пластической деформации и нагрева;
- 3 – объемное взаимодействие.

На первой стадии (50 мс) вместе с образованием физического контакта начинается выделение тепла, при этом с поверхности частично удаляются (расползаются) окисные пленки. Свариваемые поверхности сближаются на расстояние атомного взаимодействия.

На второй стадии (100 мс) температура достигает максимума, увеличивается деформация, происходит активация всей поверхности соединения, точки схватывания развиваются в пятна сварки.

Третья стадия (250 мс) – уплотнение зоны соединения, образование прочных химических связей, заканчивается слияние отдельных пятен взаимодействия и релаксация напряжений упругопластической деформации сварного шва.

3.3. Термокомпрессионная микросварка

Термокомпрессионная микросварка – сварка давлением, при которой нагрев соединяемых поверхностей осуществляется до перехода их в пластическое состояние с одновременным приложением давления. В результате воздействия двух факторов – тепла и давления – возникает пластическое течение материалов, что позволяет им сблизиться на расстояние меж-атомного взаимодействия. Получению прочного соединения способствует также взаимная диффузия материалов и образования твердых растворов в тонкой приграничной области. Тепловая энергия при этой сварке поступает в зону соединения путем теплопередачи от поверхности инструмента, нагреваемого импульсом тока (рис. 3.2).

Термокомпрессия обеспечивает сварку плоских проводников из мягких материалов с высокой электропроводностью (например, из меди) с тонкими металлическими покрытиями на жестких диэлектрических подложках (например, на керамике). Применение термокомпрессионной микросварки ограничено приемлемыми сочетаниями свариваемых материалов, например, весьма трудно сваривать никелевые и железные сплавы. Поверхности соединяемых элементов требуют очистки и активации путем обезжиривания, травления, зачистки с последующей защитой от окисления.

Термокомпрессионная микросварка классифицируется по трем признакам: по способу нагрева (рис. 3.3), по форме сварного соединения, обусловленной инструментом (рис. 3.4), по видам соединений: внахлест или

встык (рис. 3.5). На рис. 3.6 показана фотография формообразования сварки встык с образованием шарика.

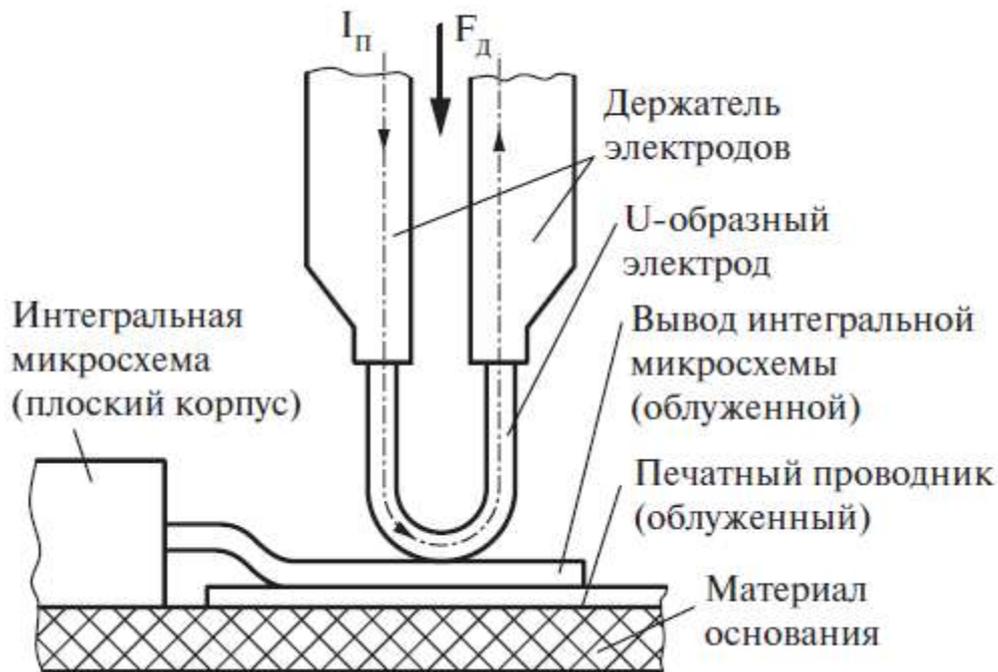


Рис. 3.2. Схема термокомпрессионной микросварки выводов микросхем к контактным площадкам монтажной подложки: I_{Π} – ток подогрева инструмента; $F_{\text{Д}}$ – усилие давления электрода на зону сварки

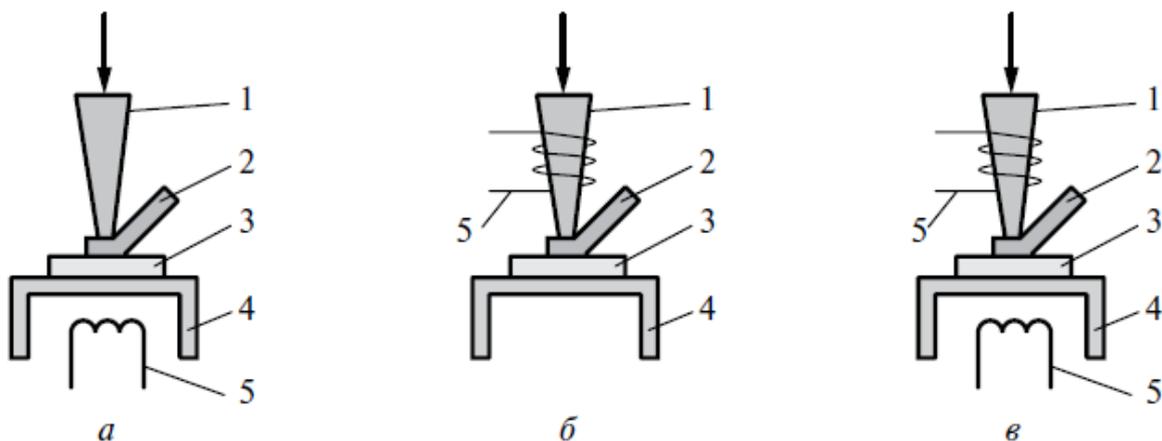


Рис. 3.3. Разновидности термокомпрессии в зависимости от способа нагрева: *а* – нагрев только рабочего столика, *б* – нагрев только рабочего инструмента, *в* – одновременный нагрев рабочего столика и инструмента, 1 – рабочий инструмент; 2 – присоединяемый вывод; 3 – монтажная подложка; 4 – рабочий столик; 5 – нагреватель

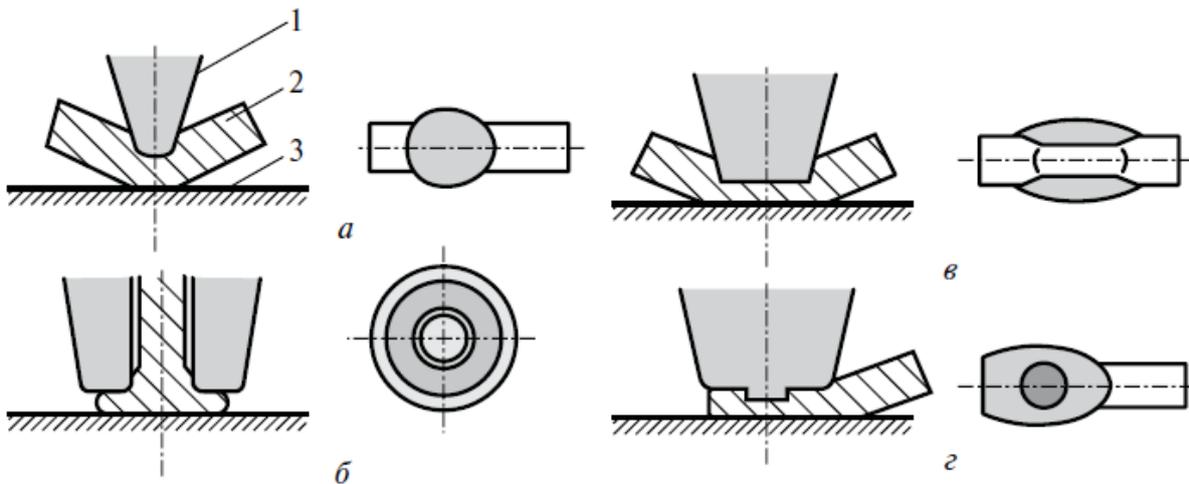


Рис. 3.4. Основные виды термокомпрессионных соединений: *а* – соединение в виде плоской сварной точки (термокомпрессия клином), *б* – соединение встык (термокомпрессия капилляром с деформацией шарика), *в* – соединение с ребром жесткости (термокомпрессия инструментом с канавкой), *г* – соединение типа «рыбий глаз» (термокомпрессия инструментом с выступом), *1* – инструмент, *2* – проволока, *3* – подложка

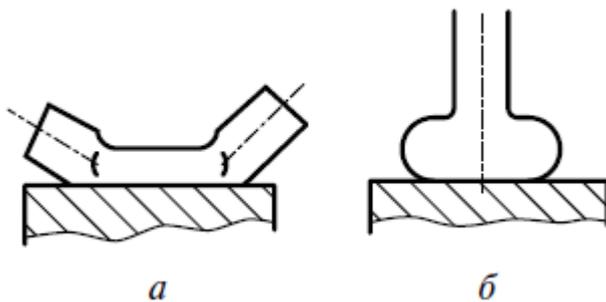


Рис. 3.5. Сварные соединения: *а* – внахлест, *б* – встык с образованием шарика

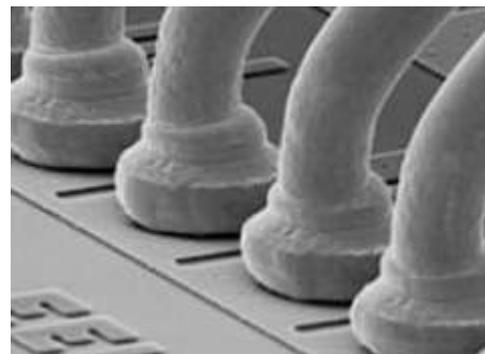


Рис. 3.6. Шарик сварного соединения встык

Для воспроизводимости температуры инструмента при выполнении большого числа сварок, следующих одна за другой, необходимо, чтобы инструмент успевал остывать к моменту выполнения следующей сварки. Иначе накапливаемое в инструменте тепло от предыдущих сварок будет приводить к его постепенному перегреву и нарушению режима сварок. Для получения малой постоянной времени необходимо, чтобы теплоемкость инструмента была ограничена его объемом порядка $0,1 \dots 0,5 \text{ мм}^3$ и была на несколько порядков меньше остальных теплоотводящих частей держателя инструмента.

Инструмент должен быть сделан из материала, который не приваривался бы к свариваемым поверхностям: молибдена, вольфрама, твердого сплава типа ВК-15 и т.п.

Метод термокомпрессии требует тщательного контроля режимов сварки: давления, температуры, времени сварки, – и поэтому может быть выполнен только в автоматическом режиме.

При наложении на инструмент ультразвуковых тангенциальных колебаний (рис. 3.7) усиливается эффект роста площади контакта и разрушения (размывания) окисных пленок. Для этого используют, например, ультразвуковой генератор мощностью 100 Вт, частотой 20 кГц, создающий амплитуду колебаний инструмента порядка 10 мкм. Механические колебания в зоне сварки приводят к увеличению количества пятен срачивания, к разрастанию их в узлы схватывания и выталкиванию окисных пленок из зоны сварного шва.

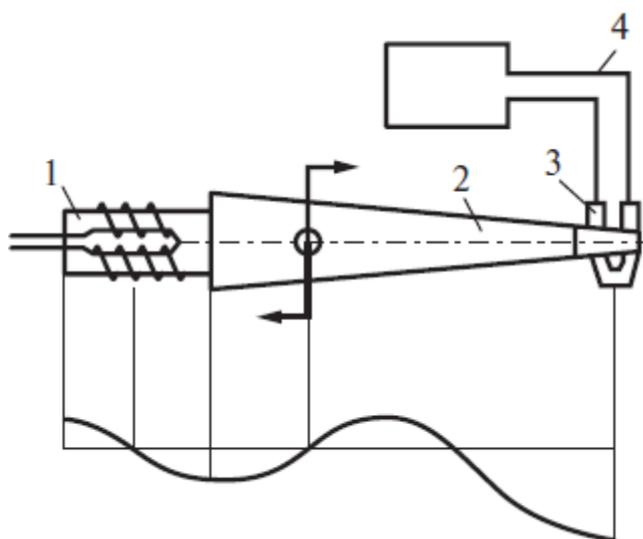


Рис. 3.7. Схема термокомпрессионной сварки с наложением ультразвуковых колебаний

Сварка термокомпрессией наиболее распространена в микроэлектронике для соединения выводов кристалла с выводами корпуса микросхемы. В этом случае для присоединения к кристаллу используется шариковый вывод, а присоединение проволоочки к торцу выводу осуществляется внахлест или так называемым методом термокомпрессии клином. Для того, чтобы микросварное соединение оставалось устойчивым после снятия внешней силы, необходимы мягкие пластичные материалы, так как у упругих материалов возникают разрушения под действием внутренних напряжений. Поэтому для контактирования с контактными площадками кристалла применяют тонкую золотую проволочку диаметром порядка 25 мкм или алюминиевую.

Недостатком использования золотой проволоки является высокая стоимость и плотность золота, невысокое сопротивление разрыву – 120 Н/мм^2 , приверженность к образованию с алюминиевыми покрытиями кристаллов микросхем хрупких и пористых соединений типа Al_xAu_y . Ис-

пользование выводов из чистого алюминия также ограничено из-за невысокой прочности – 75 Н/мм^2 . Это вынуждает увеличивать диаметр проволоки до 100 мкм , а это влечет за собой увеличение размеров контактных площадок. Лучшие характеристики демонстрируют алюмо-кремниевые и алюмо-магниевые сплавы, прочность которых составляет 450 Н/мм^2 . Проволоки для микросварок из этих сплавов выпускают диаметром $27...50 \text{ мкм}$.

Элементы, подлежащие микросварке, должны пройти определенные стадии подготовки: очистку поверхностей, а золотую проволоку подвергнуть отжигу.

Температура процесса – $150...350 \text{ }^\circ\text{C}$, длительность импульса нагрева $0,2...0,5 \text{ с}$. Давление передается соединяемым деталям электродом, радиус которого приблизительно соответствует диаметру проволочки. Это давление составляет $0,2...1,5 \text{ Н}$. Материал электродов выбирается исходя из необходимости обеспечения низкой теплопроводности, высокой прочности при температурах до 500°C , отсутствием схватывания со свариваемыми деталями. К таким материалам можно отнести вольфрам и молибден или твердые сплавы типа ВК-6М, ВК-15, если нагрев производится инструментом (рис. 3.8), или синтетический корунд, если используется внешний нагрев. При длительной работе поверхность металлических электродов окисляется и загрязняется выделяющимися продуктами нагрева. В потоке защитного газа исключается образование загрязняющих окисных пленок.

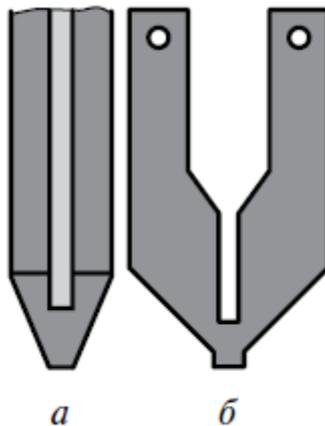


Рис. 3.8. Примерная форма инструмента, нагреваемого проходящим током

Последовательность операций соединения контактных площадок на кристалле микросхем с внешними выводами корпуса или монтажной подложки показана на рис. 3.9.

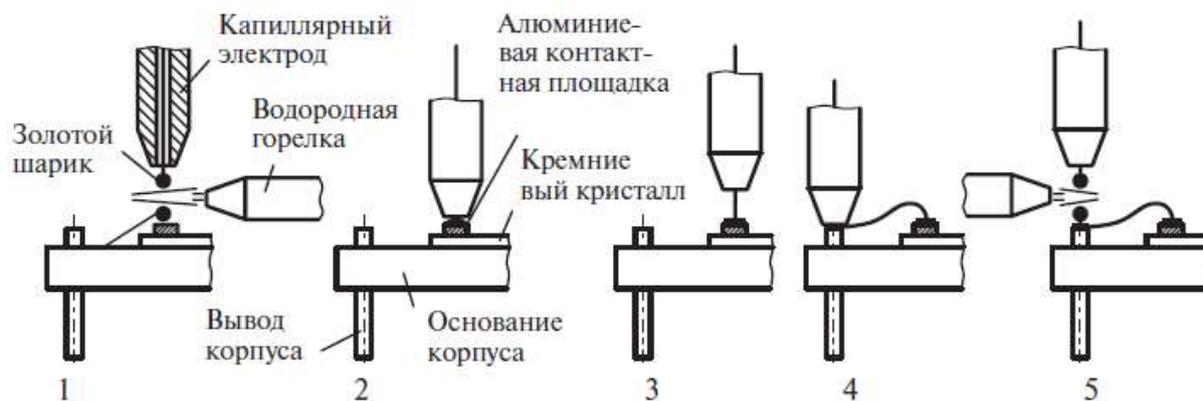


Рис. 3.9. Схема процесса микросварки: 1 – оплавление золотой проволоочки с образованием шарика; 2 – присоединение проволоочки к контактной площадке кристалла; 3 – подъем капиллярного электрода; 4 – присоединение проволоочки к внешнему выводу корпуса; 5 – подъем электрода и оплавление проволоочки

3.4. Точечная электродуговая сварка

Преимущество электродуговой сварки в противоположность сварке расплюснутым электродом состоит в том, что переходное сопротивление между электродом и деталью не влияет на параметры сварки. Передача тепла при расплавлении нижней из соединяемых деталей происходит только за счет теплопередачи, поэтому вывод элемента и контактная площадка печатной платы должны находиться в хорошем термическом контакте, который обеспечивается специальным прижимом. Для свободно горящей дуги минимальный ток составляет около 1 А при напряжении 450...550 В. Чистое время сварки составляет около 30 мс. Принимая во внимание время, необходимое для позиционирования, на печатной плате может быть выполнено 12 микросварок с шагом 1,27 мм в течение 1 с (рис. 3.10).

Точечная электродуговая монтажная микросварка характеризуется наличием кратковременно зажигаемой электрической дуги, которая образуется между вольфрамовым электродом и деталью. Зажигание дуги происходит при:

- соприкосновении электрода с деталью и отвода его;
- высокочастотной ионизации воздушного зазора.

За этим следует выключение сварочного импульса.

Благодаря омыванию места сварки аргоном достигается чистая и блестящая поверхность точечной сварки.

Недостаток электродуговой микросварки – использование высоких напряжений разряда, противопоказанного современным микросхемам.

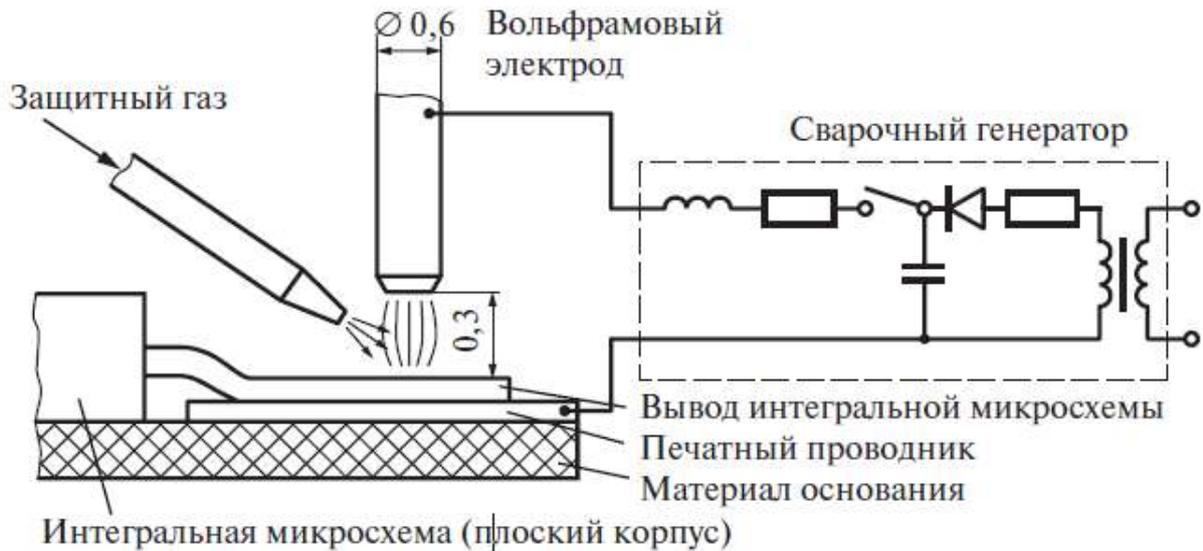


Рис. 3.10. Принцип точечной электродуговой сварки

3.5. Лучевая микросварка

Лучевая микросварка основана на сильном локальном нагреве соединяемых материалов или сфокусированным лучом лазера (лазерная сварка), или пучком электронов (электроннолучевая сварка), или потоком ионов (плазменная сварка). При этих способах сварки плавлением желателен лишь теплофизический контакт между деталями в зоне сварки.

В качестве источников излучения используют газоразрядные лампы высокого давления, отличающиеся близкой к точечной зоной горения, которую удобно фокусировать на малоразмерный объект сварки (рис. 3.11).

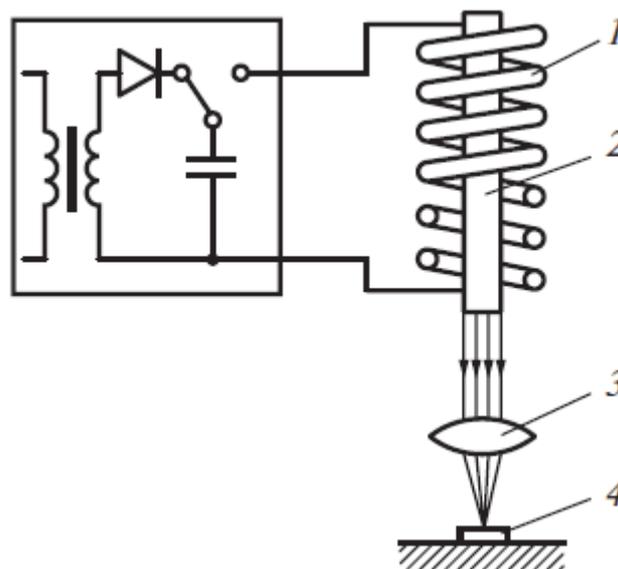


Рис. 3.11. Принцип лазерной сварки: 1 – источник света; 2 – активное тело лазера; 3 – система линз; 4 – вывод микросхемы

Вместе с тем их спектр излучения хорошо согласуется со спектром поглощения большинства металлов и расходится со спектром поглощения диэлектриков, что очень удобно для пайки компонентов на печатных платах.

Дозирование энергии производят с помощью фотозатворов.

Важные преимущества лучевой микросварки:

- отсутствие непосредственного контакта с зоной пайки;
- достаточно большое расстояние до объекта пайки;
- возможность сварки через прозрачные стенки и среды, что необходимо для условий вакуумной гигиены.

Лучевая сварка лазерным лучом отличается гораздо большей плотностью энергии – до 10^9 Вт/см². При этой плотности энергии испаряются все применяемые для соединений металлы.

Благодаря незначительной дивергенции (расхождению) лазерного луча его энергию можно сконцентрировать в пятно диаметром до 10 мкм. Так как импульс лазера можно сделать очень коротким, процесс нагрева элементов сварки сводится к адиабатическому, то есть потери на теплоотдачу во внешнюю среду во время сварки отсутствуют.

Энергия светового луча адсорбируется на поверхности свариваемых деталей и переходит в тепло. Глубина, в которой поглощается энергия, небольшая – всего 5...50 нм. В процессе интенсивного нагрева выделяются пары сублимирующих металлов, которые затевают луч для дальнейшего расплавления соединения. Поэтому часто излучение лазера модулируют, создавая паузы для рассасывания паров.

Разновидности форм соединений при сварке планарных выводов на контактные площадки печатных плат (рис. 3.12):

- концевая сварка – лазерный луч расплавляет конец вывода и частично контактную площадку;
- центральная сварка – лазерный луч направлен только на вывод и должен его проплавить;
- сварка с пробивкой отверстия – лазерный луч проплавляет отверстие и через него – часть контактной площадки.

Ремонтно-пригодной является концевая сварка, для этого она и предназначена. Но попасть лучом в край вывода очень сложно. Позиционирование легче осуществить при центральной сварке.

Типичные режимы лазерной сварки:

- энергия импульса 1...2 Вт/с;
- длительность импульса 4...8 мс;
- диаметр пятна нагрева ~200 мкм.

Серьезным недостатком лучевой сварки и пайки является недоступность нагрева J-выводов и BGA-компонентов.

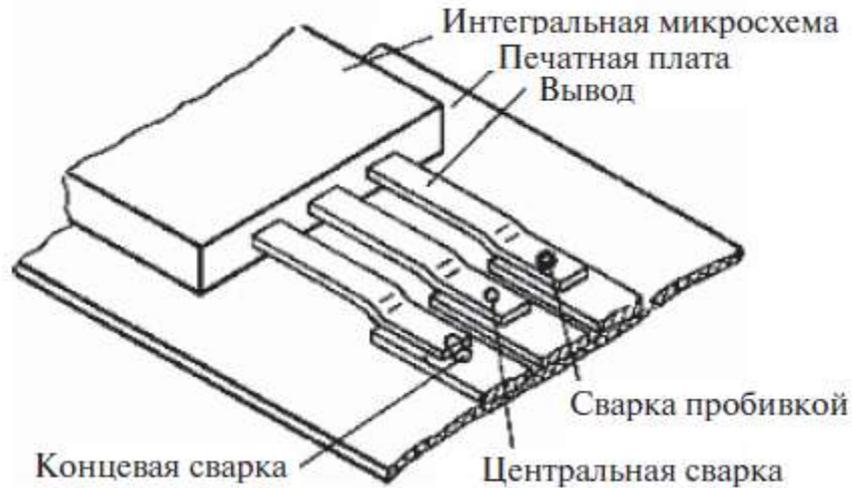


Рис. 3.12. Разновидности монтажной лазерной сварки

3.6. Вопросы для самопроверки

1. Какие виды микросварки вы знаете?
2. Какие преимущества и недостатки микросварки вы знаете?
3. Объясните механизм образования сварного шва.
4. Назовите основные виды термокомпрессионных соединений.
5. В чем преимущества и недостатки электродуговой микросварки?
6. В чем преимущества и недостатки лучевой микросварки?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Изучение пайки паяльниками

Цель работы. Изучить пайку паяльниками, пайку сопротивлением и типичные дефекты пайки.

4.1. Локальная пайка

Локальный нагрев при пайке имеет определенное преимущество по сравнению с общим, так как является щадящим для участков изделия, не подвергающихся пайке. В случае применения элементной базы с планарными выводами, требующими прижима каждого вывода в момент пайки, предпочтительнее локальный нагрев паяных швов. Пайка сводится к повторному расплавлению в присутствии флюса дозы припоя, предварительно нанесенной на вывод и контактную площадку во время лужения. Механическую фиксацию навесных элементов осуществляют приклеиванием тела элемента к подложке. Локальность нагрева не исключает возможности проведения группового процесса пайки.

4.2. Пайка паяльниками

Контактный способ основан на нагреве электрическим током жала паяльника и передаче тепла в локальное место пайки путем прижима жала.

Для уменьшения постоянной времени нагрева и охлаждения применяют электрический нагрев жала паяльника. Температуру жала паяльника стандартно устанавливают на 30...40°C выше температуры плавления припоя. Но также успешно практикуется перегрев жала паяльника на 70...90°C. Перегрев повышает уровень активации поверхностей взаимодействующих металлов. Кратковременность перегрева позволяет пренебречь окислительными процессами на поверхности припоя и металла, тем более что они защищены флюсом.

Недостатком метода является зависимость температуры, развиваемой в зоне пайки, от теплоемкости и теплопроводности паяемого узла, от плотности прижатия жала (рис. 4.1).

Увеличением теплоемкости жала паяльника это явление не компенсируешь, так как следствием его является увеличение времени нагрева инструмента. Проблему решают, как показано на рис. 4.2:

- увеличение мощности паяльника;
- приближение нагревателя к точке нагрева;
- приближение датчика температуры к точке пайки.

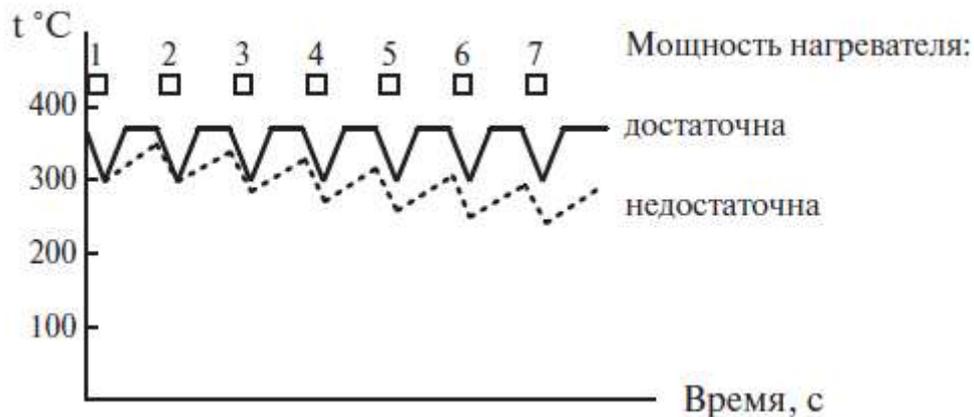


Рис. 4.1. Изменение температуры жала паяльника от одной точки пайки к другой

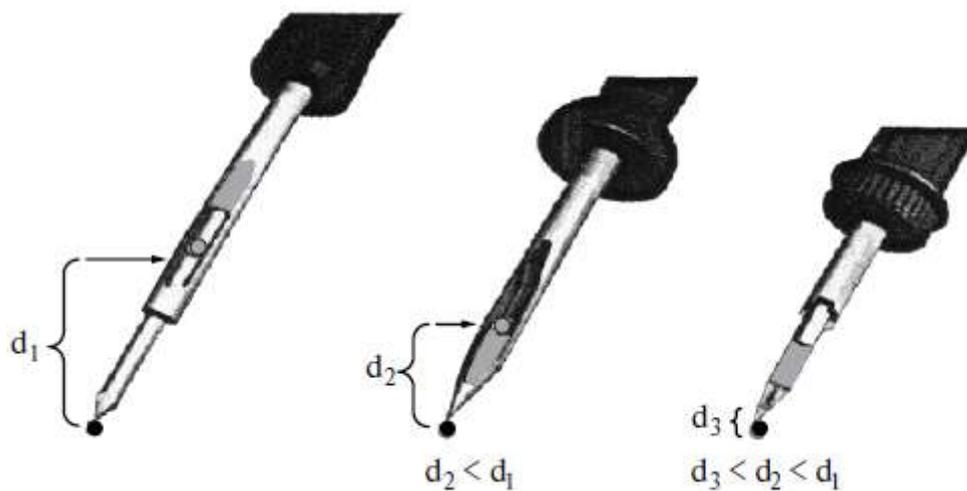


Рис. 4.2. Конструкции паяльников: черный кружок – точка пайки; серый кружок – датчик температуры; серое тело – нагреватель

4.3. Пайка сопротивлением

В этом случае тепло выделяется в U-образном электроде (рис. 4.3). Большое преимущество этого метода в том, что нагрев сопровождается придавливанием выводов компонента к монтажному элементу (к контактной площадке) на плате. Давление инструмента снимается только после остывания паяного узла до затвердевания припоя. Таким образом, выводы компонента принудительно фиксируются в пайке, независимо от их исходного положения над платой.

Эти виды паек хорошо управляются формированием импульса тока нагрузки. Схема групповой пайки планарных выводов микросхем ленточным нагревателем показана на рис. 4.4.

Недостатки:

- неспособность пайки разнородных компонентов с одной настройки режимов;

- загрязнения электродов флюсом и окислами припоев искажают режимы пайки.

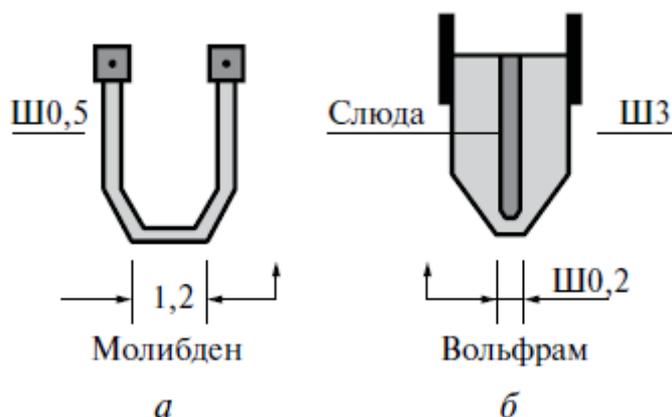


Рис. 4.3. Жало наконечника малой массы для пайки сопротивлением:
a – с площадью касания $0,2 \text{ мм}^2$; *б* – $0,04 \text{ мм}^2$

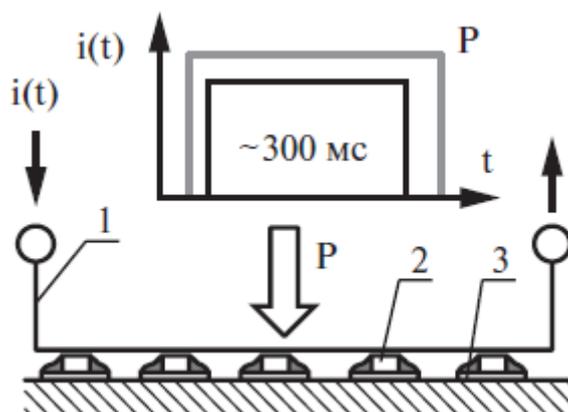


Рис. 4.4. Импульсный нагрев паек ленточным нагревателем:
 1 – нагреватель; 2 – планарные выводы компонента;
 3 – контактные площадки на плате

4.4. Типичные дефекты пайки

4.4.1. «Холодные» пайки

Это самый распространенный дефект пайки, будучи пропущенным и неисправленным, наиболее часто досаждают пользователям из-за неустойчивого контакта. При тестировании непосредственно в производстве этот дефект не распознается (за исключением ИК-контроля). Впоследствии диффузия влаги и кислорода воздуха окисляет соприкасающиеся поверхности, что создает эффект неустойчивого (мерцающего) контакта. Мало того, окисленные поверхности не позволяют восстановить качество соединения при повторной пайке (ремонте).

Внешнее проявление «холодной» пайки, вызванной неполным оплавлением: зернистость поверхности, неполное слияние частиц припоя в

пасте, неполное смачивание и скатывание припоя со спаиваемых поверхностей. Чтобы гарантированно распознавать холодные пайки, припой или пасту дозируют так, чтобы образовалась скелетная, но не заливная пайка. На скелетной пайке можно видеть, имеется смачивание спаиваемых поверхностей или нет.

Причины «холодных» паек связаны со всеми элементами технологии монтажа:

- недостаточный прогрев паек;
- случайный сдвиг спаиваемых элементов во время охлаждения пайки;
- ослабление активности флюса из-за перегрева или сильного загрязнения спаиваемых поверхностей;
- недостаточная активность флюса, из-за чего не обеспечивается активация и смачиваемость поверхностей припоем;
- окисление порошкообразного припоя в пасте;
- неустойчивые свойства финишных покрытий;
- загрязнение припоя: при пайке волной – растворенными металлами, при пайке оплавлением – газовой выделением из компонентов или оснований печатных плат.

Для удовлетворительной текучести припоя и смачиваемости рабочая температура пайки должна превышать температуру ликвидуса на 30...40 градусов. При ручной пайке время пребывания припоя при этой рабочей температуре должно быть 2...3 с, а при групповом нагреве температура нагрева паек должна следовать установленному температурному профилю (время пребывания в расплавленном состоянии – 30...90 с). Для бессвинцовых припоев, для которых характерна плохая смачиваемость, для удовлетворительной пайки приходится поднимать рабочую температуру еще на 20...30 градусов.

Сдвиг спаиваемых элементов во время остывания припоя тоже может быть причиной дефектов паек. Сдвиг может возникнуть из-за сильного обдува при охлаждении или из-за толчков конвейера. Если это произойдет в момент перехода температуры от ликвидуса к солидусу, припой необычно быстро затвердевает с образованием крупнокристаллической пористой структуры, проявляющейся как образование матовости. Пористость паек создает условия окисления паек и, как следствие, их последующего ослабления.

Перегрев флюса быстро приводит к потере его активности, поэтому для них всегда оговаривают температурный диапазон пайки. Использование среды азота нивелирует это явление, но не бесконечно. Сильные загрязнения поверхностей, хотя они и маловероятны в рабочей практике, нейтрализуют активность флюса, и он перестает работать.

Недостаточная активность флюса может быть обусловлена его собственными свойствами или недостаточным нагревом паек, из-за чего он не

активирует спаиваемые поверхности. В этой ситуации он не замещается расплавленным припоем и остается прослойкой между припоем и спаиваемой поверхностью. Расплавленный припой не смачивает поверхности и застывает так, что образуются «холодные» пайки.

Как бы там ни было, в каких бы условиях ни хранили припойную пасту, окисление поверхности его микроскопических частиц припоя неизбежно. Это одна из причин ограничения срока хранения паяльных паст. Пайка с использованием устаревшего припоя в пасте всегда чревата плохими последствиями, в первую очередь – образованием «холодных» паек.

Финишные покрытия печатных плат сильно сказываются на вероятности образования «холодных» паек. В первую очередь это относится к покрытиям иммерсионным оловом, если не используется барьерный подслоя. Тонкий слой иммерсионного олова быстро (за две недели) прорастает интерметаллоидами SnXCuY и теряет паяемость. Наличие барьерного подслоя гарантирует паяемость на несколько лет. Поэтому нужно оговаривать характер покрытия: не всякое иммерсионное олово может длительно сохранять паяемость.

Чревато дефектами и часто используемое покрытие иммерсионным золотом по никелю. Характерный для этого покрытия дефект – черные контактные площадки, появляющиеся на поверхности из-за оголения никеля и выпотевания фосфора, если тонкий слой золота растворяется в припое раньше, чем припой смочит поверхность никеля. Происхождение фосфора в никеле обусловлено особенностями процесса его химического осаждения.

Припой скатывается с фосфорированной и окисленной поверхности никеля, из-за чего и проявляется эффект черной контактной площадки. Черные контактные площадки могут возникать также при передержке процесса пайки и при неправильном выборе флюса. Передержка интенсифицирует образование интерметаллидов олова с никелем и олова с фосфором, внедренным в никель. Кроме того, выделение фосфора на поверхности никеля может вызвать и процесс золочения. Осаждение золота из нейтральных электролитов уменьшает вероятность этих явлений.

Загрязнения припоев значительно сказываются на их свойствах. Зачастую дорогостоящая процедура очистки ванн припоя заставляет производителей терпеть насыщение ванны загрязнениями до конца, пока не будет явно видно, что нужно остановиться и очистить припой. Но до того как выявится эта необходимость, часть паек (пусть незначительная) окажется «холодной».

Термодеструкция полимеров печатных плат и компонентов порождает выделение газов и паров воды, которые могут спровоцировать пассивацию поверхностей и ухудшению их способности к образованию качественных паяных соединений.

4.4.2. Отсутствие смачивания

Отсутствие способности смачиваться припоем проявляется подобно воде на жирной поверхности. Поверхность первоначально покрывается припоем, но затем ретрагирует, вызывая стягивание припоя в отдельные капли и гребни. Уменьшение способности смачиваться представляет проблему для множества оснований и подвергает риску качество паяных соединений, сокращая размеры галтелей припоя.

Причины уменьшения способности поверхности смачиваться состоят в: 1) плохой и неравномерной паяемости спаиваемых деталей; 2) ухудшении работы флюса; 3) термодеструкции компонентов пайки; 4) неправильно подобранных термопрофиле и среде пайки; 5) выделении в зону пайки газов и паров воды.

Отсутствие смачивания проявляется в отсутствии или недостаточности покрытия припоем контактной площадки или вывода. С части спаиваемых поверхностей припой скатывается. Это связано с большим краевым углом смачивания между припоем и спаиваемыми поверхностями.

Неудовлетворительная смачиваемость металлизации может быть объяснена наличием загрязнений или оксидной пленки или свойствами металлизации контактных площадок или выводов. Например, наличие фосфора на поверхности никеля под золотом, окисление никеля под тонким слоем иммерсионного золота, окисление медных контактных площадок, оголенные в результате обрезки кончики выводов, слишком толстый слой органического защитного покрытия (OSP) – все это может способствовать неудовлетворительному смачиванию.

Причиной плохой смачиваемости могут быть и припои. Загрязнения припоя могут привести к неудовлетворительному смачиванию. Форма и размер частиц припоя связаны со скоростью их окисления. При окислении больше критического флюс не справляется с функцией раскислителя, он истощается и все это приводит к худшему смачиванию.

Время, температура и среда пайки значительно влияют на смачивание. Недостаточный прогрев паек либо из-за слишком короткого времени, либо из-за слишком низкой температуры приведет к неполному химическому взаимодействию флюса с поверхностью, а также неполному металлургическому смачиванию поверхности. Однако чрезмерный перегрев при оплавлении припоя не только послужит причиной чрезмерного окисления поверхностей контактных площадок и выводов, но также выжжет больше флюса. Оба явления приведут к неудовлетворительному смачиванию. Окисление происходит в среде, содержащей кислород (пайка в среде воздуха). Использование нейтральной среды азота при пайке приводит к существенному улучшению смачивания.

Как правило, припой легко смачивает контактные площадки, получившие горячее облуживание, например, при использовании процесса,

называемого HASL (Hot Air Solder Leveler – горячее облуживание с выравниванием воздухом), так как пайка по этому покрытию сводится к слиянию расплавленного припоя из паяльной пасты с припоем из покрытия HASL. Другие финишные покрытия плат, такие как органическое защитное покрытие (OSP) или иммерсионное золото по никелю (ImmAu/Ni или, что то же самое, ENIG – Electroless Ni & Immersion Gold – химический никель под иммерсионным золотом) не обеспечивают полного смачивания, периметр контактных площадок часто не смачивается, хотя образование соответствующей галтели припоя может произойти. Меньшее растекание припоя по поверхностям с финишными покрытиями, отличными от HASL, объясняется необходимостью большей энергии и времени для химического взаимодействия компонентов пайки и образования металлургических связей припоя с этими покрытиями.

Недостаточное смачивание можно расценивать как критическое, если образованное паяное соединение не обладает достаточной прочностью связи и сопротивлением усталости. Однако если галтель припоя имеет надлежащий краевой угол, соединение считается надежным, даже если не вся поверхность контактной площадки смочена припоем. Для компонентов с малым шагом выводов размеры отверстий в трафарете для нанесения пасты часто делают меньше размеров контактной площадки, чтобы предотвратить образование перемычек припоя между выводами. В результате припоя не хватает, чтобы покрыть всю поверхность контактных площадок, но создаются условия для образования хорошей скелетной пайки. Обычно покрытие контактной площадки припоем более чем на 90% считается приемлемым.

Уменьшение способности смачиваться может также произойти в результате газовой выделения из материалов, окружающих пайку (корпусов компонентов, печатных плат, защитной маски и др.). Распад органических соединений или выделение паров воды под действием температуры пайки образуют газовую среду, пассивирующую поверхности. Водяной пар может также образовываться при использовании водорастворимых флюсов. При температурах пайки водяной пар является сильным окислителем и приводит к окислению поверхностей расплавленного припоя и границ раздела деталей с расплавленным припоем, на которых неизбежно образуются интерметаллические соединения. Как только интерметаллическое соединение оказывается незащищенным от внешней среды, оно окисляется и становится несмачиваемым. Уменьшение способности смачиваться зависит от количества выделившегося газа, состава газа и расположения места выделения газа. Чем больше его количество и чем больше водяного пара, тем интенсивнее идут процессы дезактивации поверхностей и уменьшение способности смачиваться.

4.4.3. Эффект «надгробного камня»

Эффект «надгробного камня» – это поднятие одного вывода чип-компонента, например конденсатора или резистора, когда компонент встает торчком на один из своих выводов. Эффект надгробного камня также известен как эффект Манхэттена, эффект подъемного моста и эффект Стоунхенджа. Он вызван несбалансированным смачиванием выводов компонента при пайке и, соответственно, несбалансированностью сил поверхностного натяжения расплавленного припоя, действующих на выводы, как показано на рис. 4.5. Здесь имеются три силы, действующие на чип-компонент: 1) вес чип-компонента; 2) вертикальный вектор поверхностного натяжения F_2 поверхности расплавленного припоя под чип-компонентом; 3) вертикальный вектор поверхностного натяжения F_3 поверхности расплавленного припоя с правой стороны чип-компонента. Силы F_1 и F_2 направлены вниз и стремятся удержать компонент на месте, в то время как сила F_3 стремится поставить компонент в вертикальное положение. Эффект «надгробного камня» имеет место, когда сила F_3 превышает сумму сил F_1 и F_2 .

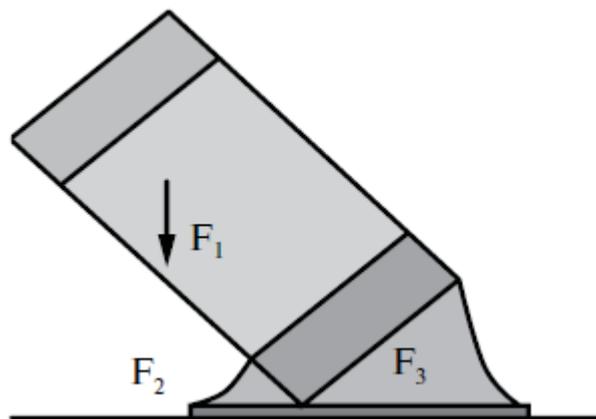


Рис. 4.5. Эффект «надгробного камня»

Расстояние между контактными площадками, размеры контактных площадок, размеры выводов чип-компонента и распределение термоаккумулирующей способности сильно влияют на возникновение эффекта «надгробного камня». Несоответствующее расстояние между двумя контактными площадками под чип-компонент может послужить причиной эффекта «надгробного камня». Слишком малое расстояние приведет к смещению чип-компонентов на каплях расплавленного припоя. Слишком большое расстояние послужит причиной легкого отделения одного из выводов от контактной площадки.

Например, для чип-резисторов 0805 оптимальный зазор, при котором эффект «надгробного камня» будет минимален, составляет примерно 1 мм. Уменьшение этого зазора привело бы к большему эффекту «надгробного

камня», вследствие увеличившегося смещения легких чип-компонентов на больших каплях расплавленного припоя. В то же время минимальное перекрытие выводов чип-компонента и контактных площадок также привело бы к большему эффекту «надгробного камня» вследствие легкого отделения любого из двух выводов от контактной площадки. Следовательно, просто ради снижения эффекта «надгробного камня» оптимальный зазор между контактными площадками должен быть чуть меньше зазора между выводами чип-компонента.

Размеры контактных площадок тоже оказывают влияние на эффект «надгробного камня». Слишком маленький выбег контактных площадок за пределы выводов компонентов уменьшит эффективный угол и, следовательно, увеличит вертикальный вектор силы отрыва со стороны галтели припоя и усугубит эффект «надгробного камня». Если контактная площадка слишком широка, то чип-компонент проявит тенденцию к смещению и нарушению равновесия удерживающих сил, действующих на противоположные выводы, что приведет к эффекту «надгробного камня».

Кроме прямоугольных контактных площадок используются площадки другой формы. Замечено, что круглые контактные площадки обеспечивают меньший эффект «надгробного камня», чем прямоугольные или квадратные. Точная причина этого различия не установлена.

Размеры металлизации торцов – выводов чип-компонента – еще один фактор, влияющий на эффект «надгробного камня». Если область металлизации под чип-компонентом слишком мала, они уменьшают удерживающую силу, приложенную к нижней поверхности компонента, которая противодействует вынуждающей силе образования «надгробного камня», и, следовательно, усугубят этот эффект.

Градиент распределения температур также может сказаться на проявлении эффекта «надгробного камня». Контактная площадка, соединенная с большим теплоотводом, может иметь меньшую температуру, чем противоположная ей контактная площадка, что, следовательно, может привести к эффекту «надгробного камня». Инфракрасная пайка коротковолновым излучением создает затенение высокими компонентами, следовательно, создает градиент температур. Конвекционная пайка создает более равномерный нагрев и потому менее склонна к эффекту «надгробного камня».

Неравномерная паяемость металлизации выводов компонентов или металлизации контактных площадок подложек по каким-либо причинам приводит к неуравновешенности сил, приложенных к обоим выводам компонента и служит причиной эффекта «надгробного камня». Если финишное покрытие контактных площадок – горячий или оплавленный оловосвинец, смачивание контактных площадок произойдет практически мгновенно, как только припой расплавится. Поэтому даже при малейшей разнице температур между контактными площадками на одной из них смачи-

вание припоем произойдет раньше, чем на другой, и это приведет к эффекту «надгробного камня».

Эффект «надгробного камня» может быть снижен или устранен при выполнении следующих мер.

В отношении процесса или конструкции:

- использовать большую по ширине и площади металлизацию под чип-компонентом;
- обеспечить соответствующее расстояние между контактными площадками под чип-компонент;
- применять надлежащее распространение контактных площадок за пределы выводов чип-компонента. Круглые площадки кажутся более перспективными, чем прямоугольные или квадратные;
- уменьшить ширину контактных площадок;
- минимизировать неравномерности распределения теплоемкости элементов пайки, включая соединение контактных площадок с теплоотводами;
- минимизировать эффект затенения с помощью соответствующего конструирования и выбора методов пайки оплавлением;
- использовать органические защитные покрытия или покрытия никель/золото или Sn вместо покрытия Sn-Pb на медных контактных площадках;
- снизить уровень загрязнения или окисления металлизации выводов компонентов или металлизации контактных площадок;
- уменьшить дозу нанесения паяльной пасты;
- повысить точность установки компонентов;
- использовать низкую скорость нагрева при пайке оплавлением. Избегать применения метода пайки в паровой фазе;
- подсушивать пасту перед пайкой или использовать профиль пайки с продолжительной зоной стабилизации для снижения скорости газовой выделенной флюсов;
- использовать профиль пайки с очень низкой скоростью повышения температуры при переходе через температуру плавления припоя.

В отношении материалов:

- использовать флюс с меньшей скоростью смачивания;
- использовать флюс с меньшим объемом газовой выделенной;
- использовать паяльную пасту с замедленным оплавлением, например со смесью оловянного порошка или со сплавами с широким диапазоном кашицеобразного состояния.

4.4.4. Сдвиг компонента

Сдвиг или смещение компонента относительно предназначенных ему контактных площадок на печатной плате (рис. 4.6) обычно возникает

из-за несбалансированности поверхностного натяжения расплавленного припоя на выводах чип-компонента. Он может рассматриваться как ранняя стадия развития эффекта «надгробного камня». Факторы, служащие причиной эффекта «надгробного камня», как правило, также провоцируют сдвиг. Причины сдвига дополняются: 1) подвижкой компонентов потоком теплоносителя; 2) несимметричной формой контактных площадок под выводы чип-компонента; 3) слишком малой шириной металлизации нижней поверхности выводов компонентов; 4) неравномерно плохой паяемостью выводов компонентов; 5) слишком узкими контактными площадками.

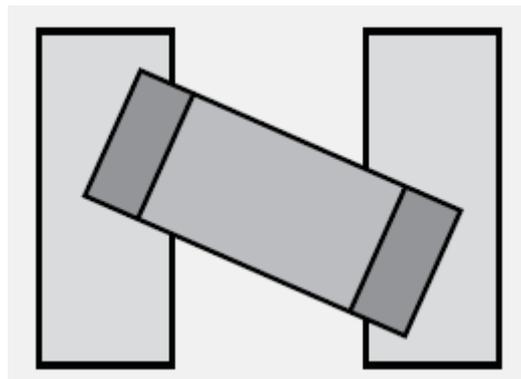


Рис. 4.6. Сдвиг компонента

Уменьшения сдвига можно достичь при следующих условиях.

В отношении процесса или конструкции:

- снизить скорость нагрева при пайке. Избегать использования метода пайки в паровой фазе;
- обеспечить симметричную конструкцию контактных площадок под оба вывода чип-компонентов, включая размеры площадок и их тепловую массу, соединение с внутренним теплоотводом на плате и эффект затенения для ИК-пайки;
- увеличить ширину и площадь металлизации нижней поверхности выводов компонентов;
- увеличить ширину контактных площадок;
- снизить уровень загрязнения металлизации компонентов и контактных площадок печатных плат;
- улучшить условия хранения компонентов и пасты;
- уменьшить объем отпечатков пасты;
- повысить точность позиционирования компонентов;
- подсушить пасту перед пайкой, для того чтобы снизить интенсивность газовыделений из флюсов.

В отношении материалов:

- использовать флюс с меньшей интенсивностью газовыделения;
- использовать флюс с меньшей скоростью смачивания;

- использовать паяльную пасту с замедленным оплавлением. Например, смесь порошков припоя и свинца в составе паяльной пасты.

4.4.5. Отток припоя

При оттоке из зоны пайки припой смачивает вывод компонента лучше, чем контактную площадку, предпочитая уходить на поверхность с хорошей смачиваемостью. Это проявляется в том, что припой поднимается вверх по выводу, обедняя зону соединения. Отток проявляет себя до такой степени, что образуется обедненное паяное соединение или вообще отсутствие припоя в зоне соединения.

Отток происходит в три этапа, как показано на рис. 4.7. На первом этапе вывод помещается в паяльную пасту. На втором этапе паста, соприкасающаяся с горячим выводом, расплавляется и капиллярно оттекает вверх по выводу компонента. На третьем этапе образуется обедненное припоем соединение или полное отсутствие механического и электрического контакта. Непосредственными причинами капиллярного оттока являются перепад температур между выводом и платой, создающий разницу в поверхностном натяжении расплавленного припоя. На стадии оплавления вывод благодаря своей меньшей теплоемкости становится горячее платы.

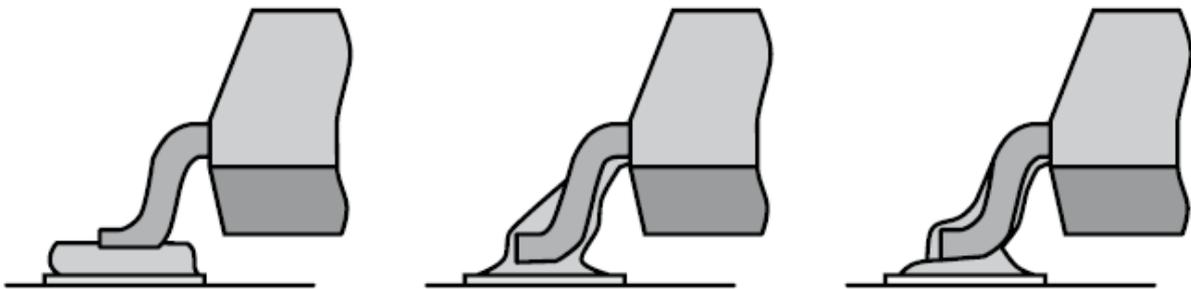


Рис. 4.7. Последовательность стадий капиллярного оттока: слева: вывод помещается в паяльную пасту; посередине: плавящаяся паяльная паста может уплыть из области соединения на вывод; справа: когда расплавленный припой перетечет на вывод, его не хватит для формирования полноценной паяной галтели

Использование подогрева снизу позволяет сначала нагреть плату, и паяльная паста плавится и смачивает контактные площадки платы. И когда контактные площадки смочены, припой не оттекает вверх на выводы, так как выводы нагреваются позже. Нагрев снизу может быть достигнут путем применения более интенсивного нагрева снизу в некоторых печах оплавления, например в инфракрасной печи оплавления. Если более интенсивный нагрев снизу невозможен вследствие ограничений, налагаемых конструкцией печи, использование низкой скорости повышения температуры

позволит теплу распространяться через плату более равномерно, исходя из естественного распространения тепла, и снизить эффект капиллярного оттока припоя.

Причины капиллярного оттока могут быть усугублены неудовлетворительной копланарностью выводов. Кроме того, более легкое смачивание выводов будет способствовать перетоку припоя на выводы. Например, использование легкоплавких финишных покрытий, таких как горячее облуживание выводов в тигле с расплавленным оловом-свинцом, позволит расплавленному припою из паяльной пасты легко перейти на поверхность выводов. Использование флюса с большой скоростью смачивания или сплавов припоя с хорошей смачивающей способностью будет также способствовать явлению капиллярного оттока припоя. Применение припоя с замедленным плавлением или широким температурным диапазоном между ликвидусом и солидусом способствует уменьшению эффекта капиллярного оттока припоя. Использование флюса с высокой температурой активации увеличивает время разогрева до начала пайки, за это время наступает температурное равновесие и, следовательно, уменьшается эффект капиллярного оттока.

Наличие рядом с монтажной контактной площадкой металлизированного отверстия (рис. 4.8) – еще один пример ситуации, в которой легко может произойти капиллярный отток припоя. Здесь припой стягивается в сквозное отверстие, оставляя вывод без паяной галтели. Причины такого оттока устраняются проще посредством: 1) покрытием пути оттока паяльной маской; 2) защитой сквозного отверстия паяльной маской, если оно не монтажное; 3) использованием неплавких финишных покрытий на печатной плате.

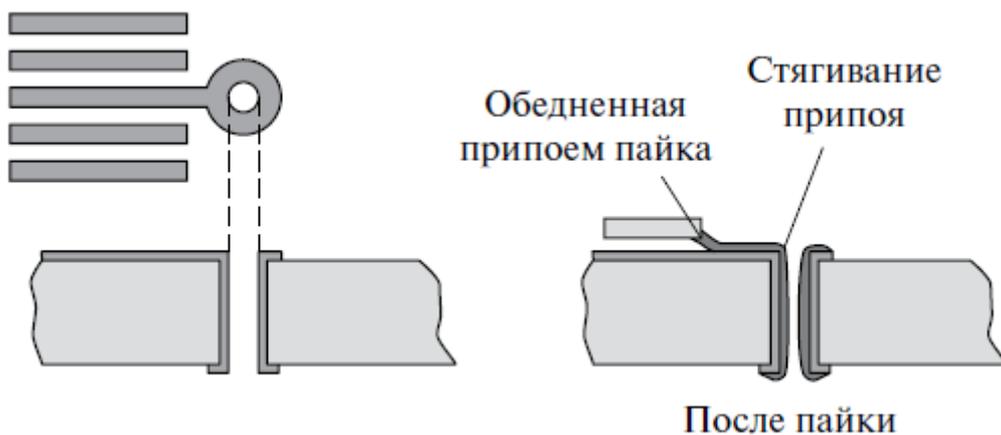


Рис. 4.8. Отток припоя с монтажной площадки в металлизированное отверстие

Методы устранения капиллярного оттока припоя можно подытожить следующим образом:

В отношении процесса или конструкции:

- использовать меньшую скорость нагрева. Избегать использования метода пайки в паровой фазе;
- использовать более интенсивный нагрев снизу, чем сверху;
- улучшить копланарность выводов компонентов;
- использовать оловянные финишные покрытия или другие нелегкоплавкие покрытия для платы и выводов;
- наносить паяльную маску между контактной площадкой и сквозным отверстием;
- защитить сквозное отверстие паяльной маской, если оно не используется как монтажное;
- уменьшить кривизну выводов.

В отношении материалов:

- использовать пасту с меньшей склонностью к расползанию, например, пасту с более высокой вязкостью;
- использовать флюс с меньшей скоростью нарастания активности;
- использовать флюс с более высокой температурой активации;
- использовать паяльную пасту с широким температурным диапазоном расплавления и отвердевания, например смесь порошка припоя со свинцовым порошком.

4.4.6. Образование перемычек

Образование перемычек всегда начинается с образования мостиков из паяльной пасты по причинам: 1) нанесения избыточного количества пасты; 2) расползания пасты; 3) избыточного давления при установке компонента; 4) смазывания пасты. Во время пайки избыток пасты образует мостики припоя в зазорах между контактными площадками.

Приемы снижения или устранения образования перемычек сводятся к следующим:

- уменьшить объем паяльной пасты с помощью использования трафарета меньшей толщины и уменьшением размеров перфораций в трафарете;
- повысить качество обработки «окон» в трафарете;
- уменьшить давление при установке компонентов;
- избегать смазывания нанесенной на плату пасты;
- использовать «более холодный» профиль пайки или меньшую скорость повышения температуры;
- нагревать плату раньше, чем компоненты. Избегать использования метода пайки в паровой фазе;
- использовать флюс с меньшей скоростью смачивания;
- использовать флюс с меньшим содержанием растворителей;
- использовать флюс с более высокой температурой начала активации.

Для процессов пайки оплавлением паяльных паст механизм образования пустот более сложный. Как правило, дегазация захваченного флюса является непосредственной причиной образования большинства пустот, и меньшее содержание пустот означает меньшее количество захваченного флюса. Содержание пустот уменьшается с повышением паяемости. Уменьшение размера частиц припоя служит причиной лишь незначительного усиления образования пустот. Образование пустот также является функцией интервала времени от сплавления частиц припоя в пасте до раскисления металлизации. Чем раньше происходит сплавление частиц припоя, тем интенсивнее будет образование пустот.

Методы сдерживания процессов образования пустот включают в себя: 1) улучшение паяемости компонентов/оснований; 2) использование флюсов с большей активностью; 3) уменьшение степени окисленности припоя; 4) использование инертной среды нагрева; 5) уменьшение скорости повышения температуры на стадии предварительного нагрева для обеспечения нормального процесса флюсования до оплавления; 6) обеспечение достаточного времени пребывания при максимальной температуре.

4.4.7. Отсутствие электрического контакта

Данный дефект заключается в отсутствии электрического контакта при наличии механического соединения в пайке.

Эффект подушки – это расположение вывода на припое, которое выглядит как вывод, лежащий на подушке, без образования электрического контакта. Он показан на рис. 4.9 и вызван отсутствием смачивания вывода припоем. Методы устранения эффекта подушки такие же, как и те, которые используются в случае отсутствия смачивания, как было рассмотрено раньше.

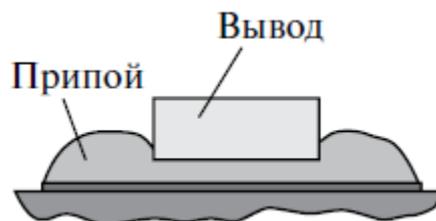


Рис. 4.9. Эффект подушки

Отсутствие электрического контакта также часто ассоциируется с другими дефектами пайки, такими как эффект «надгробного камня» или крайние случаи капиллярного оттока припоя. Это также может быть скорректировано с помощью методов, описанных выше.

Отсутствие электрического контакта может также быть обусловлено смещением при установке компонентов. Очевидно, эту проблему необхо-

димо решать путем улучшения точности позиционирования компонентов при установке.

Коробление компонентов или плат также может служить причиной отсутствия электрического контакта, особенно часто случающееся при монтаже компонентов типа BGA. Методы решения проблемы в этом случае могут включать в себя: 1) придание жесткости и прямолинейности корпусов компонентов; 2) предотвращение неравномерного или локализованного нагрева.

Отсутствие электрического контакта может быть также результатом растрескивания, инициируемого механическими напряжениями, например при пайке PBGA. Это может быть вызвано несоответствием коэффициентов теплового расширения и может быть устранено уменьшением градиента температуры между платой и компонентами.

Чрезмерное образование интерметаллических соединений на границах раздела паяных соединений может также служить причиной отсутствия электрического контакта, например при пайке SCSGA на плате с застаревшим HASL-покрытием.

Частным случаем отсутствия электрического контакта является отслаивание галтели припоя и контактной площадки от основания печатной платы. На рис. 4.10 схематически показано паяное соединение вывода компонента QFP до и после отслаивания галтели. Это часто происходит при пайке деформированных выводов. В процессе остывания пайки это механическое напряжение, создаваемое деформированными выводами, ведет себя как пружина при растяжении. Нагрев платы при пайке значительно снижает прочность сцепления контактной площадки с основанием платы, и это приводит к отслаиванию галтели припоя от платы.

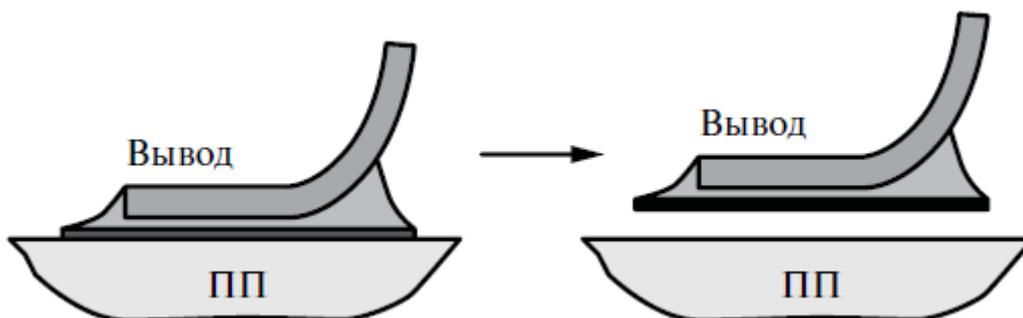


Рис. 4.10. Отслаивание галтели от основания платы

4.4.8. Образование шариков припоя

Образование шариков припоя – наиболее широко освещенная проблема из тех, которые связаны с процессом использования паяльных паст. При пайке маленькие сферические частицы различного диаметра могут отделяться от основной массы припоя и не сливаться с ней после затвердева-

ния. В большинстве случаев эти частицы состоят из порошкообразного припоя, используемого в паяльной пасте. Однако в других случаях шарики припоя могут быть результатом слияния нескольких частиц припоя.

Образование шариков припоя вызывает опасения по поводу образования металлических мостиков, вызывающих короткие замыкания, и уменьшения изоляционных зазоров с увеличением токов утечки. Расход припоя на образование шариков приводит к формированию соединений с недостаточным количеством припоя. Образование шариков совсем недопустимо при отсутствии операции отмывки плат после пайки.

Происхождение шариков припоя часто обуславливается смазыванием пасты при трафаретной печати, например из-за неотрегулированности зазора между трафаретом и платой. Наличие на контактных площадках слишком больших доз пасты может привести к вытеканию припоя из зоны соединения. Отсутствие должного совмещения перфораций трафарета с монтажными контактными площадками может привести к аналогичному результату.

Образование шариков припоя может быть вызвано неудовлетворительной паяемостью выводов компонентов и финишного покрытия плат. На устранение сильного окисления поверхностей расходуется излишнее количество флюса, что, соответственно, приведет к недостатку флюсующей среды для предотвращения образования шариков припоя.

Продолжительное хранение пасты в некондиционных условиях также усугубит образование шариков припоя. Обычно это проявляется при хранении паяльной пасты в условиях, выходящих за рамки рекомендуемых.

Недостаточная сушка может также привести к образованию шариков припоя, в некоторых пастах может остаться небольшое количество летучих соединений, которые могут привести к разбрызгиванию во время пайки. Поэтому образование шариков припоя уменьшается с увеличением времени сушки. Однако и пересушивание паст тоже чревато отрицательными последствиями, так как это может слишком сильно окислить порошкообразный припой и привести к образованию шариков припоя.

Несоответствующий профиль пайки также может привести к образованию шариков припоя. Слишком большая скорость нагрева может послужить причиной разбрызгивания. Это особенно верно в случае лазерной пайки. Кроме того, профиль пайки со слишком длинной стадией предварительного нагрева может способствовать чрезмерному окислению припоя и может привести к образованию шариков припоя. В процессе пайки оплавлением, применяющимся сейчас, редко используется операция сушки, что обусловлено требованием высокой производительности и более совершенными печами оплавления и технологией паяльных паст.

Летучие соединения, включенные в состав флюса, – еще одна причина образования шариков припоя. В некоторых печах оплавления использу-

ется ИК-нагрев, тогда летучие соединения, задерживаемые коркой затвердевшей поверхности, могут ее взорвать и вырваться на поверхность с разбрызгиванием и образованием шариков припоя. При использовании нагрева в длинноволновом диапазоне ИК-излучения лучевая энергия проникает в объем паяльной пасты и равномерно прогревает его без образования поверхностной корки. В конвекционной пайке используется горячая среда, которая может окислить паяльную пасту и, следовательно, привести к образованию шариков припоя. Это особенно усугубляется высокой скоростью потока газа в печи. Для паяльных паст со слабой активирующей флюсующей способностью использование азотной среды пайки может эффективно снизить образование шариков припоя.

Образование шариков припоя провоцируется влажной средой. Это вызвано ускоренным окислением припоя и кипением поглощенной влаги. Паяльные пасты с гигроскопичными флюсами наиболее часто создают этот эффект, который усиливается при длительном воздействии среды с относительной влажностью 85%. Вообще рекомендуется поддерживать относительную влажность производственной среды на уровне 60% и ниже. Однако необходимо отметить, что благодаря прогрессу в технологии флюсов несколько современных паяльных паст могут выдерживать воздействие высокой влажности до 85% в течение 24 часов без образования шариков припоя.

Взаимодействие между паяльной маской и паяльной пастой служит еще одной причиной образования шариков припоя. Даже небольшие области недоотвержденной маски с низкой температурой перехода могут выделить достаточный объем летучих соединений на стадии оплавления, чтобы образовать шарики припоя.

Методы уменьшения разбрызгивания и образования шариков припоя:

В процессе пайки:

- избегать пребывания пасты во влажной среде;
- использовать операцию сушки паст и плат;
- использовать температурный профиль с продолжительным предварительным нагревом и режимом стабилизации;
- использовать инертную среду пайки.

При выборе материалов:

- использовать флюс с минимальным количеством гигроскопических составляющих;
- использовать пасты с флюсом, обеспечивающим низкую скорость смачивания.

4.4.9. Образование пустот

Наличие пустот сказывается на механических свойствах паяных соединений и ухудшает их прочность, пластичность, усталостную долговечность. Пустоты могут объединяться с образованием трещин и, следовательно, приводить к разрушению паек. Ухудшение прочности паяных соединений может происходить из-за увеличения напряжений и деформаций припоя, вызванного пустотами. Кроме того, при больших плотностях тока пустоты могут служить причиной точечного перегрева и, следовательно, снижения надежности соединений.

Считается, что в общем случае образование пустот может быть объяснено: 1) сдвигом припоя во время затвердевания; 2) дегазацией материала плат при пайке компонентов, монтируемых в металлизированные отверстия; 3) внедренным в припой флюсом.

Поэтому меры по предотвращению образования пустот следующие:

- улучшение паяемости соединяемых пайкой поверхностей;
- использование флюсов с большой активностью;
- уменьшение окисления припоя в пасте;
- использование инертной среды в процессе пайки оплавлением паяльных паст;
- уменьшение темпов роста температуры в зонах предварительного нагрева и стабилизации температуры для полноты протекания реакций с участием флюса до зоны оплавления;
- обеспечение полного завершения процесса расплавления и смачивания в зоне пайки.

4.5. Выводы

В процессе пайки происходит смачивание расплавленным припоем спаиваемых поверхностей, растворение спаиваемых металлов и химическое взаимодействие между припоем и основными металлами. Результатом растворения является образование интерметаллического соединения. Его толщина находится в зависимости от времени, температуры, типа припоя и типа металлизации контактных площадок и выводов. Хотя образование интерметаллического соединения желательно для достижения необходимой прочности паяных соединений, его наличие снижает паяемость при последующих пайках. Более тонкий слой интерметаллического соединения предпочтительнее для большей механической прочности и лучших усталостных характеристик паяных соединений, и достигается это снижением температуры и времени пайки.

Деформация твердеющего припоя при остывании вызывает скольжение уже образовавшихся зерен по границе раздела кристаллов, образование крупнокристаллической структуры пайки с характерной матовой по-

верхностью. Пайки с крупнокристаллической структурой галтели быстро корродируют по межкристаллитным прослойкам и изначально имеют низкую прочность.

Образование мелкокристаллического паяного соединения предпочтительнее для лучшего сопротивления ползучести и усталостным разрушениям и может быть достигнуто быстрым охлаждением строго эвтектических сплавов и использованием добавок, уменьшающих размер зерна.

Загрязнения и примеси в припоях могут ухудшать поверхностное натяжение, смачивание, стойкость к окислению и внешний вид паяных соединений.

В целом пайка – это операция, обеспечивающая низкую стоимость, высокую производительность и высокое качество соединений. Однако это возможно только при строгом соблюдении режимов формирования паяных соединений во время и после пайки и использовании высококачественных материалов, компонентов и печатных плат.

4.6. Вопросы для самопроверки

1. Назовите достоинства и недостатки пайки паяльниками.
2. Назовите достоинства и недостатки пайки сопротивлением.
3. Назовите причины «холодных» паек.
4. Назовите причины уменьшения способности поверхности смачиваться.
5. Чем вызван эффект «надгробного камня»?
6. Применением каких мер может быть снижен или устранен эффект «надгробного камня»?
7. При каких условиях можно достичь уменьшения сдвига?
8. Назовите методы устранения капиллярного оттока припоя.
9. Назовите приемы снижения или устранения образования перемычек.
10. Назовите методы уменьшения разбрызгивания и образования шариков припоя.
11. Назовите меры по предотвращению образования пустот.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

Изучение припоев для монтажной пайки

Цель работы. Изучить припои на основе олова и свинца, а также припои для бессвинцовой пайки.

5.1. Низкотемпературные припои

Припоями являются металлы, которые расплавляются ниже температуры плавления контактируемых (спаиваемых) металлов. Так как сплавы металлов всегда имеют температуру плавления меньше, чем у любого из компонентов сплава, в качестве припоев используют сплавы. Из всех сплавов в качестве припоев используют те, которые являются хорошо смачивающими жидкостями и способны образовывать металлическую связь с соединяемыми металлами.

Дополнительно оцениваются такие факторы, как температурный интервал кристаллизации сплава (припоя), стоимость и дефицитность компонентов, интенсивность их испарения (угара) и растворения в основном металле, способность припоя растворять соединяемые металлы (загрязняться растворяемыми металлами), когезионная прочность, свойства химических соединений металлов с припоями (интерметаллоидов).

Из всех систем сплавов в качестве припоев традиционно много лет используют эвтектические. Именно в этих сплавах отверждение (кристаллизация) происходит сразу во всем объеме при самой низкой для данной системы температуре.

Неэвтектические сплавы кристаллизуются в широком температурном диапазоне, что увеличивает время, необходимое для охлаждения паяного узла, в течение которого соединяемые детали должны оставаться строго неподвижными, чтобы не сдвинуть остывающий полуотвердевший припой.

Если твердеющий припой из неэвтектического сплава потревожить даже незначительным сдвигом (микросдвигом), мгновенно наступает общая кристаллизация с выделением крупных кристаллов с непрочными межкристаллическими связями. Практически трудно в групповых процессах пайки жестко зафиксировать спаиваемые детали относительно друг друга, чтобы при остывании припоя предотвратить какой-либо сдвиг.

Неэвтектическим сплавам свойственно явление зональной ликвации – образования структурной неоднородности. Получается сплав со сложной структурой, что создает в паяном узле локальные напряжения, способные при определенных условиях привести к разрушению паяного соединения. В припое эвтектического состава ликваций не наблюдается.

Поэтому надежность паек неэвтектическими сплавами значительно хуже. Наилучшим образом зарекомендовал себя для монтажной пайки эв-

тектический сплав олово-свинец с содержанием олова 61% (ПОС-61). Он имеет наименьшую температуру плавления, наименьшую межкристаллитную пористость, наилучшие капиллярные свойства. Единственный его недостаток – дороговизна олова.

5.2. Диаграмма сплавов олово-свинец

Возможные фазы ряда сплавов олово-свинец и их соотношения показывает диаграмма состояния на рис. 5.1.

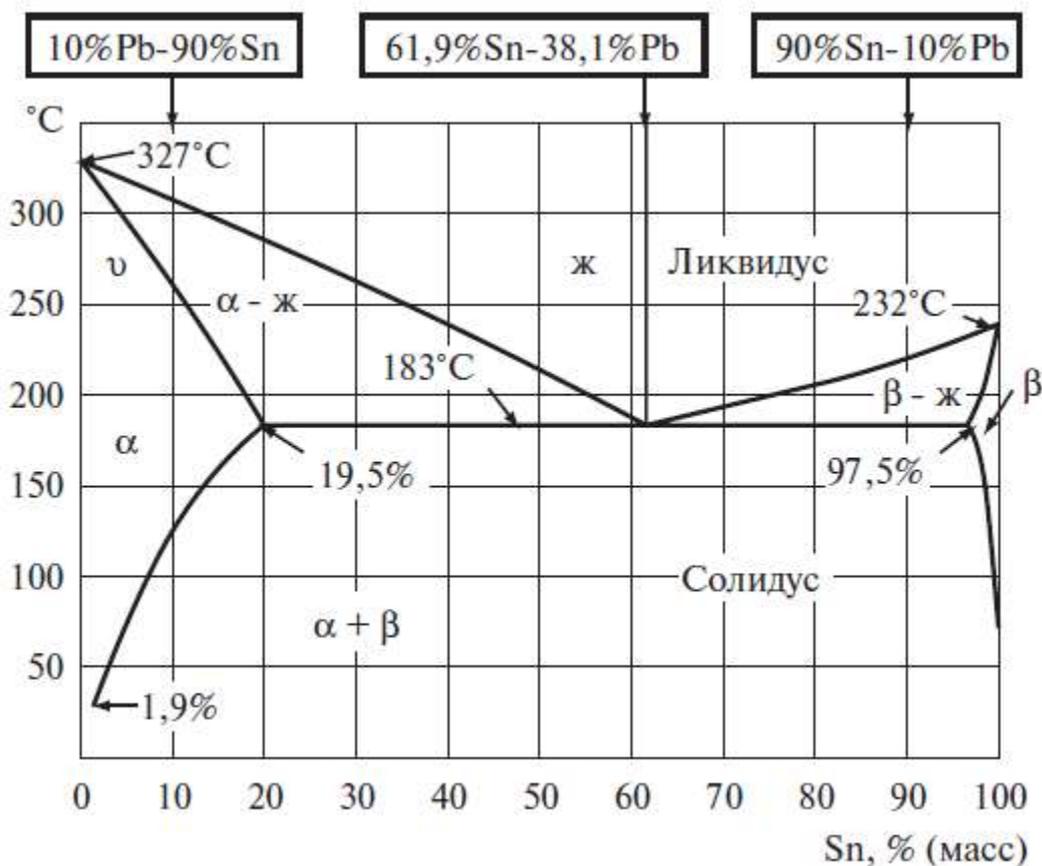


Рис. 5.1. Диаграмма сплавов олово-свинец

В зависимости от соотношения олова и свинца в сплаве могут существовать два вида твердых растворов: богатый свинцом α -твердый раствор и богатый оловом β -твердый раствор. При эвтектической температуре 183°C и эвтектическом составе 61,9% Sn и 38,1% Pb образуется эвтектика, т.е. из сплава выделяются одновременно α -раствор и β -раствор, минуя область двух фаз. Так как α - и β -раствор растут одновременно, то они распределяются очень тонко, из-за чего эвтектическая структура получает мелкокристаллический вид.

В сплаве из 90% Pb и 10% Sn при охлаждении происходит следующее: при переходе линии ликвидуса, которая ограничивает жидкую фазу,

выпадает α -раствор. При достижении линии солидуса, ниже которой существует только твердая фаза, структура α -раствора при 183 °С имеет максимальную растворимость около 19% для олова. С понижением температуры уменьшается растворимость соответственно линии растворимости 19,5-1,9%. Олово выпадает из твердого α -раствора в форме β -раствора.

В сплавах с 90% Sn и 10% Pb при переходе линии ликвидуса образуются первые, богатые оловом β -растворы. Остаточный сплав обогащается свинцом. При эвтектической температуре около 183°С затвердевает приблизительно две трети общего количества β -раствора. Остаточный сплав благодаря обогащению свинцом достигает эвтектического состава (61,9% Sn и 38,1% Pb) и эвтектически затвердевает. Процесс расслоения в твердом состоянии, который может длиться еще продолжительное время при комнатной температуре, типичен для системы Pb-Sn и имеет свои причины непрерывного снижения растворимости Pb в Sn от 19% при 183 °С до 1,9% при 20 °С.

Жидкий припой растворяет соединяемые металлы, за счет чего его свойства могут ухудшаться. Растворяя основной металл, он может уменьшать толщину и без того тонких покрытий, например микронных покрытий серебра на керамике. Скорость растворения основного металла или металлопокрытия при пайке (температура 270 °С) волной припоя (мкм/с): для никеля – 0,43; для меди – 1,56; для серебра – 2,8; для золота – 0,4.

Для предотвращения насыщения припоя посторонними для него компонентами применяют защитные (паяльные) маски, закрывающие металлические поверхности, не подлежащие пайке, используют малорастворимые в припое барьерные покрытия, например никель на меди. Легирование припоя предотвращает растворение металлов и улучшает свойства припоев.

Примеры легирования:

- *ПОС61Су* – припой, легированный сурьмой, обладает повышенной механической прочностью;
- *ПОС61М* – припой, легированный медью (до 2%), не растворяет медь, предназначен для пайки микропроводов;
- *ПСр* – припой, легированный серебром;
- *ПСрОСИп* – сплав олова, свинца, сурьмы, серебра, индия. Предназначен для пайки и лужения тонких проводов из золота и серебра или покрытых ими деталей. Присадки индия значительно увеличивают способность припоя к смачиванию поверхностей.

В групповых процессах пайки, когда неизбежно образуются большие поверхности испарения расплавленного припоя (например, при пайке волной припоя), олово быстрее угорает, чем свинец, и сплав постепенно перестает быть эвтектическим. Для таких случаев загрузку ванны производят сплавом с избыточным содержанием олова (63...64%), а при корректировке ванны содержание олова доводят до 65%.

На качестве паяк сильно сказывается температура: при низкой температуре не происходит полноценного смачивания припоем спаиваемых поверхностей – образуются «холодные» пайки. В свою очередь, при перегреве пайки горит флюс (загрязняется паяный шов) и образуются тройные сплавы: медь-олово-свинец (оловянистая бронза), никель-олово-свинец, температура плавления которых – порядка 700 °С, т.е. они приобретают свойства твердой пайки – не поддаются демонтажу. Однако самое опасное при перегреве – разрушение электронных компонентов и печатных плат.

5.3. Примеры мягких припоев

Висмутовые припои обладают низкой температурой плавления, при кристаллизации увеличиваются в объеме, что бывает нужно для предотвращения усадочных явлений, однако недостаточно хорошо смачивают поверхности пайки. Пример: сплав Розе с температурой плавления 93,7°С.

Кадмиевые припои обладают самой низкой температурой плавления (сплав Вуда – 66 °С), более высокой прочностью и пластичностью, чем оловянно-свинцовые, однако недостаточно хорошо смачивают поверхности пайки.

Индиевые припои обладают исключительно хорошей смачиваемостью ко всем поверхностям, даже к стеклу, керамике, кремнию. Добавление индия к любому припою существенно улучшает его смачиваемость. Однако индий как редкоземельный элемент крайне дефицитен.

Галлиевые припои способны формировать паяный шов при температурах пайки 40...50 °С. При этих температурах в жидкий галлий вводят тонкие металлические порошки: меди, или никеля, или серебра и т.д. Галлий растворяет введенный в него металл, образуя твердый раствор с температурой плавления более 300 °С (до 800 °С). Технологическое время жизни (время, в течение которого его можно еще использовать): при комнатной температуре – 40 минут, в холодильнике – месяц.

В качестве порошка в галлий вводят, как правило, тот же металл, что и спаиваемые поверхности. Например, для пайки меди используют припой ПГМ65, где галлия 65%, остальное – медь, для пайки никеля – ПГН54, где галлия 54%, остальное – никель. Главное назначение галлиевых припоев – электромонтажная пайка деталей, нагрев которых противопоказан.

5.4. Припои для бессвинцовой пайки

Решение экологических проблем при утилизации электронной аппаратуры потребовало изъятия из обращения припоев, содержащих свинец. Многие страны поставили решение этой проблемы на государственный уровень. Сегодня выдано более ста патентов на сплавы различных составов для замены свинцовых припоев. Не все сплавы коммерческие, но вы-

бор достаточно широкий. В настоящее время сложно ответить на вопрос, какой сплав самый лучший, поскольку абсолютно равноценной замены эвтектическим до сих пор не предложено. Сплавы отличаются как по температуре плавления, так и по смачиваемости, прочности, стоимости. Каждый припой обладает уникальным сочетанием свойств, что затрудняет окончательный выбор.

Но принципиальное отличие бессвинцовых припоев от эвтектических сплавов олово-свинец в их большой температуре плавления и плохой смачиваемости. И то и другое вынуждает поднимать рабочие температуры паяк, что ускоряет процессы термодеструкции элементов межсоединений и изоляции. Подъем температуры на каждые восемь градусов ускоряет процесс разрушения в два раза. Поэтому Директива RoHS ES, предписывающая с 1 июля 2006 г. повсеместный переход на бессвинцовую пайку, не распространяет свои требования на аппаратуру ответственного назначения: военную, системы безопасности и др., для которой надежность имеет первостепенное значение. Для другой аппаратуры (по большей части бытового назначения), для которой предписано использовать бессвинцовую пайку, приходится использовать новые более нагревостойкие базовые и вспомогательные материалы, компоненты в термоустойчивых корпусах, оборудование другого класса. В общей сложности стоимость электронной и электротехнической аппаратуры без свинца возрастает на 30%.

При переводе изделий на бессвинцовую пайку приходится учитывать целый ряд факторов. Припои подбирают, исходя из особенностей конструкции устройства, топологии печатной платы, механических и электрических характеристик блока, условий его эксплуатации. При выборе учитывают также температуру плавления припоя, смачиваемость спаиваемых поверхностей, надежность, устойчивость монтируемых компонентов и монтажных подложек к температуре пайки, различия режимов при пайке оплавлением и волной припоя.

Основной критерий при выборе припоя – это температура плавления. Все припои по этому признаку можно разделить на четыре группы: низкотемпературные (температура плавления ниже 180 °С), с температурой плавления, равной эвтектике Sn63/Pb37 (180...200 °С), со средней температурой плавления (200...230 °С) и высокотемпературные (230...350 °С).

Низкотемпературные припои имеют ограниченное применение. В их состав входят кроме олова еще дорогие висмут и индий. Самые распространенные эвтектические сплавы – олово-висмут и олово-индий. Трудно ожидать, что сплавы с низкой температурой плавления обеспечат надежные паяные соединения при высоких температурах эксплуатации. Существуют также ограничения по поставкам индия и висмута, высока стоимость припоев на их основе.

Большинство среднетемпературных припоев для замены свинца – это сложные по составу сплавы на основе олова с добавлением меди, сере-

бра, висмута и сурьмы. К сожалению, ни один из них не может полностью заменить Sn63/Pb37, у всех сплавов выше температура плавления и хуже смачиваемость. Наиболее близкий по своим свойствам припой Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7 сегодня используется для пайки оплавлением при поверхностном монтаже.

Сплавы с большим содержанием олова имеют температуру плавления около 230°C. В меньшем температурном диапазоне практически отсутствуют бессвинцовые припои для замены эвтектических сплавов на основе олова-свинца. Самый дешевый заменитель – это припой Sn99,3/Cu0,7, который рекомендован для пайки волной припоя. Недостаток Sn/Cu-припоев – высокая температура плавления (227°C для эвтектики), плохая смачиваемость и низкая прочность. Предпочтительны эвтектические сплавы, поскольку их кристаллизация происходит в узком температурном диапазоне. Если при этом отсутствует смещение компонентов, достигается более высокая надежность соединений (меньше вероятность получения «холодных» паек).

Лучшими свойствами обладают сплавы Sn/Ag, у них более высокая смачиваемость и прочность по сравнению с Sn/Cu. Эвтектический сплав Sn96,5/Ag3,5 с температурой плавления 221°C при испытаниях на термоциклирование показал более высокую надежность по сравнению с Sn/Cu. Припой Sn96,5/Ag3,5 многие годы применяется в Японии для монтажа массовой продукции.

Эвтектический припой Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7 был получен в результате доработки базового сплава Sn/Ag. Четыре года назад этот сплав был неизвестен, хотя припой Sn/Ag/Cu имел более низкую точку плавления (217°C) по сравнению с Sn/Ag. Sn/Ag/Cu может быть использован для получения как универсальных, так и высокотемпературных припоев.

Припой Sn93,5/Ag3,5/Bi3 имеет более низкую температуру плавления и более высокую надежность паяных соединений. Сплав обладает наилучшей паяемостью среди всех бессвинцовых припоев. Добавление меди и/или германия к Sn/Ag/Bi значительно повышает смачиваемость, а также прочность паяного соединения.

Припой Sn89/Zn8/Bi3 имеет температуру плавления, близкую к эвтектике Sn/Pb, однако наличие в его составе цинка приводит к ряду проблем. Припойные пасты на этой основе имеют короткое время жизни, требуется флюс повышенной активности, при оплавлении образуется труднорастворимая окалина, паяные соединения подвержены коррозии, обязательно требуется тщательная промывка соединений после пайки.

Сегодня в промышленности массового производства наилучшей альтернативой для замены эвтектики Sn62/Pb38 в аппаратуре общего назначения является сплав Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7 с температурой плавления 217 °C, что на 34 °C выше Sn62/Pb38. Но рабочая температура пайки этим припоем еще больше, чем 34 °C, из-за его низкой смачиваемости. Для улучшения

смачиваемости рабочую температуру вынуждены поднимать еще на 20 °С. Таким образом, если для сплава Sn62/Pb38 с температурой плавления 183°C рабочая температура устанавливается равной 220...230 °С, то для Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7 – 270 °С. Это значительное изменение режима пайки может привести к серьезным проблемам при монтаже аппаратуры, кардинальным изменениям в используемых материалах и техпроцессах.

Европейские стандарты рекомендуют для пайки оплавлением сплав Sn3,9/Ag0,6/Cu, для пайки волной – менее дорогие припои Sn0,7/Cu и Sn3,5/Ag, поскольку во втором случае требуются большие объемы припойного материала. В состоянии изучения находится сплав Sn/Ag3,8/Cu0,76, в качестве припоя для оплавления и пайки волной и для ремонтных работ.

Предлагаются три сплава для замены Sn/Pb – Олово/Серебро/Медь (Sn/Ag/Cu) и два сплава на основе Олово/Серебро/Висмут (Sn/Ag/Bi).

Сегодня наиболее широко распространяются сплавы системы Sn/Ag/Cu.

5.5. Проблемы бессвинцовой пайки

Бессвинцовая пайка практически ничем, кроме более высокой рабочей температуры пайки, не отличается от традиционной Sn/Pb-технологии. Однако могут потребоваться некоторые изменения режима для ряда операций техпроцесса. Так, например, новые типы припоев и флюсов могут повлиять на характеристики припойной пасты. Могут измениться такие свойства паст, как срок службы и хранения, текучесть, температур пайки, что потребует обновления оборудования для реализации новых технологий.

При воздействии повышенной температуры пайки может произойти вспучивание корпусов ИС («попкорн»), растрескивание кристаллов, нарушение функционирования схем. Схожие эффекты возникают и в печатных платах. Под действием температуры происходит расслоение основания, ухудшается плоскостность, что отрицательно сказывается на точности установки ИС, особенно в корпусах больших размеров. Большинство компонентов удалось сделать совместимыми с таким температурным режимом бессвинцовой пайки. Исключения составляют некоторые типы интегральных схем, конденсаторов и соединителей, предельная температура пайки для которых не должна превышать 225...230 °С. Во всяком случае, необходимо соблюдать предписанные режимы хранения и использования компонентов.

5.8. Вопросы для самопроверки

1. Чем отличаются эвтектические и неэвтектические сплавы?
2. Поясните, что показывает диаграмма сплавов олово-свинец.
3. Приведите примеры мягких припоев.
4. Приведите примеры припоев для бессвинцовой пайки.
5. Назовите проблемы бессвинцовой пайки.

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Изучение флюсов для монтажной пайки

Цель работы. Изучить назначение и механизм действия флюса, классификацию флюсов, а также правильность выбора припоя, флюса, температуры и времени пайки.

6.1. Назначение флюсов

Конечным условием надежной пайки является смачивание поверхности соединяемых металлов припоем. Следовательно, главным требованием к флюсу является обеспечение хорошей смачиваемости поверхности паяного шва расплавленным припоем за счет уменьшения поверхностного натяжения припоя и улучшения его растекания по всем зазорам паяного шва. Дополнительные требования состоят в том, что флюс должен:

- растворять поверхностные пленки на металле и припое, тем самым активировать поверхности;
- предотвращать окисление активированных поверхностей;
- обеспечивать и выравнивать передачу тепла в зоне пайки;
- уступать припою при смачивании поверхностей (выдавливаться из зоны спая по мере смачивания металла припоем);
- не образовывать агрессивных паров, которые могли бы конденсироваться на соседних холодных поверхностях компонентов и элементах электрической изоляции, вызывая впоследствии коррозию и отказы изоляции;
- иметь способность к удалению (отмывке) доступными средствами.

Механизм действия флюса заключается в том, что окисные пленки металла и припоя растворяются или разрыхляются и всплывают на поверхности флюса. На поверхности очищенного (активированного) металла образуется защитный слой флюса, препятствующий возникновению новых окисных пленок и загрязнений (если сам флюс не разлагается при перегреве). Жидкий припой должен замещать флюс и взаимодействовать с основным металлом. Поэтому смачиваемость припоем спаиваемых поверхностей должна быть больше, чем у флюса.

Химическая активность флюса, используемого для монтажной пайки, должна проявляться только при температуре пайки. При температурах эксплуатации аппаратуры он должен быть нейтрален, чтобы не вызывать коррозионных процессов и разрушения изоляции. Этим свойством среди других при определенных условиях обладают флюсы на основе канифоли.

6.2. Классификация флюсов

Материалы, предлагаемые в качестве флюсов для пайки электронных изделий, могут относиться к смолосодержащим и смолонесодержащим. Смолонесодержащие флюсы могут иметь ионогенные компоненты, от которых платы нужно тщательно очищать.

Основу смолосодержащих флюсов, как правило, составляет канифоль, представляющая собой смесь органических кислот. Главный компонент этой смеси – абиетиновая кислота, вторичный – терпин. Органические кислоты – такие как салициловая, молочная, стеариновая, лимонная, муравьиная и т.д. – также могут быть использованы для подготовки поверхности к пайке, однако в силу их большей активности они требуют более аккуратного обращения и тщательной промывки изделий после пайки. Эти кислоты, как и некоторые их соединения, чаще используются в качестве активаторов и добавок к флюсам на основе канифоли.

Уровень кислотности флюса на основе чистой канифоли очень мал, но в результате ее растворения в спирте и в процессе нагрева при пайке происходит ее дополнительная активация. Процесс активации канифоли начинается при температуре около 170°C. При сильном нагреве (более 270°C) происходит интенсивное разложение канифоли и потеря ее флюсоющих свойств.

Канифольные флюсы в стандартах называют смолосодержащими, имея в виду техническое название канифоли – древесная смола. Смолосодержащие паяльные флюсы классифицируются по кислотности и активности.

Бескислотные флюсы приготавливаются на основе канифоли и спиртов (одно- и многоатомных): этилового, глицерина, этиленгликолей, этилацетата и др. Например, флюсы ФКСп, ФКЭт представляют собой растворы сосновой канифоли в этиловом спирте и этилацетате (соответственно). Эти флюсы приготавливают непосредственно в производстве.

Активируют канифольные флюсы присадками химических активаторов: салициловой кислоты, органическими соединениями галогенов. Например, флюс ФКТ содержит добавку тетрабромид дипентена, а флюс ФКТС – добавку салициловой кислоты.

Использование активных флюсов для монтажной пайки категорически запрещено. Возможные их остатки при неполной отмывке вызывают интенсивное разрушение электронных узлов.

В последнее время появился и начал интенсивно распространяться комплекс смолонесодержащих водорастворимых флюсов, поддающихся удалению водными растворами моющих средств. Например, флюс ФТС, содержащий салициловую кислоту, триэтаноламин и спирт этиловый.

Составы флюсов можно найти в справочниках, стандартах и каталогах фирм-поставщиков.

В бессвинцовой пайке используют флюсы на водной основе, не содержащие VOC-компонент (Volatile Organic Compounds – композиции с органическими испаряющимися компонентами). Их преимущества состоят в невоспламеняемости, меньшей интенсивности испарения, способности быть активными в широком температурном диапазоне. Для продления жизнеспособности этот флюс может быть заморожен как сам по себе, так и в составе паяльных паст. Он обеспечивает высокое поверхностное натяжение припоя и способен флюсовать монтажные отверстия.

6.3. Флюсы на синтетической основе

В синтетических флюсах используются фенольные, полиэфирные и другие синтетические смолы с фиксированным массово-молекулярным распределением, что позволяет регулировать процесс активации и поликонденсации и получать остатки с заданными свойствами: пластичность, механическая прочность, теплостойкость, влагостойкость и др. В частности, регулируя процессы поликонденсации можно получать остатки флюса с высокой термоустойчивостью – более 125 °С, т.е. выше верхнего предела работоспособности аппаратуры. Это позволяет применять влагозащитные покрытия без удаления остатков такого флюса после пайки, если соблюсти стерильные условия прохождения плат по сквозному процессу сборки и пайки.

Полимеризующиеся флюсы, не требующие отмывки после пайки, обеспечивают хорошее качество паяных соединений на всех известных финишных покрытиях.

6.4. Типы флюсов

Флюсы классифицируются по степени активности следующим образом (приведенная ниже классификация отличается от отечественного отраслевого стандарта ОСТ 4Г0.033.200):

Тип «R» (от слова «rosin» – канифоль) представляет собой чистую канифоль в твердом виде или растворенную в спирте, этилацетате, метилэтилкетоне и подобных растворителях. Это наименее активная группа флюсов, поэтому ее используют для пайки по свежим поверхностям или по поверхностям, которые были защищены от окисления в процессе хранения. Эта группа флюсов не требует удаления их остатков после пайки, если потом электронный модуль не покрывается влагозащитным лаком.

Тип «RMA» (от слов «resin mild activated» – слегка активированная канифоль) – группа смолосодержащих флюсов, активированных различными комбинациями активаторов: органическими кислотами или их соединениями (диметилалкилбензиламмонийхлорид, трибутилфосфат, салициловая кислота, диэтиламин солянокислый, триэтаноламин и др.). Эти

флюсы обладают более высокой активностью по сравнению с типом R. Предполагается, что в процессе пайки активаторы испаряются без остатка. Поэтому они считаются абсолютно безвредными. Этот флюс тоже не требует отмывки. Но очевидно, что процесс пайки должен быть гарантированно завершен полным испарением активаторов. Такие гарантии может обеспечить только машинная пайка с автоматизацией температурно-временных процессов (температурного профиля пайки).

Тип «RA» (от слов «rosin activated») – активированная канифоль). Эта группа флюсов рекламируется для промышленного производства электронных изделий массового спроса. Несмотря на тот факт, что данный вид флюса отличается более высокой активностью по сравнению с упомянутыми выше, он также не требует смывки, поскольку его остатки якобы не проявляют видимой коррозионной активности.

Тип «SRA» (от слов «super activated resin») – сверхактивированная канифоль). Эти флюсы были созданы для нестандартных для электроники применений. Они могут использоваться для пайки никельсодержащих сплавов, нержавеющей стали и материалов типа сплава ковар. Флюсы типа SRA очень агрессивны и требуют тщательной отмывки при любых обстоятельствах, поэтому их использование в электронике строго регламентировано.

Тип «No-Clean» (не требует смывки). Эта группа специально создана для процессов, где нет возможности использовать последующую отмывку плат или она затруднена по каким-то причинам. Основное отличие этой группы состоит в крайне малом количестве остатков флюса на плате по окончании процесса пайки.

Для обеспечения высокой надежности паяных соединений смачиваемость припоем спаиваемых поверхностей является определяющей. Этому способствует активность флюса в режимах пайки. Поэтому повышенная активность флюса желательна, но при условии, если это не влечет за собой ухудшение электроизоляционных свойств монтажного основания за счет неизбежных ионногенных загрязнений, источником которых являются остатки активаторов флюсов.

6.5. Остатки флюсов

После пайки твердые или вязкие растворы окислов остаются в зоне пайки и, если потом используется влагозащитное покрытие, провоцируют осмотические процессы отслоения и пузырения лаковой пленки.

Традиционно в качестве флюса используются не сухая канифоль, а ее спиртовые растворы. И в этом состоянии она химически активна. Ее главный компонент – абиетиновая кислота – в спиртовом растворе способен растворять окислы металлов с образованием комплексных соединений. Сухая канифоль имеет нейтральную некоррозионную среду, но ее спирто-

вые растворы имеют коррозионную агрессивность, проявляющую себя, в частности, в контакте с медью. Продукты коррозии металлов в растворах канифоли имеют характерный для них цвет. Например, продукты коррозии меди имеют зеленый цвет, обусловленный наличием ионов меди в ее соединении с абиетиновой кислотой. Раствор канифоли, как правило, накапливаются в капиллярных полостях (например, под изоляционной оболочкой проводов) и герметизируются там высыхающей пленкой флюса на выходе из капилляра. Коррозия проводов в среде флюса уменьшает их сечение, что существенно для тонких проводов.

Растворяя окислы, канифоль образует с ними соединения, называемые резинатами. Они приобретают характерный для растворенных окислов цвет. Например, резинат меди имеет голубой цвет. В холодном состоянии резинаты малоактивны, но при нагреве могут проявлять коррозионную агрессивность. Поэтому отмывка узлов после пайки – обязательная процедура для технологического обеспечения надежности изделий, работающих в экстремальных условиях.

За счет содержания спирта композиция канифоли в условиях даже умеренного увлажнения приобретает способность к гидролизу (омылению). Продукты гидролиза тоже создают проводимость. Последствия гидролиза остатков канифоли наблюдаются в виде белесого налета на поверхности плохо отмытого монтажного узла. Нужно отметить, что сухие остатки канифоли гидрофобны и не поддаются гидролизу, белесость проявляется именно на недостаточно отмытых от канифоли участках платы.

Если платы покрывают электроизоляционным лаком, остатки канифоли, продуктов ее гидролиза и другие загрязнения в условиях увлажнения приводят к осмотическим явлениям, завершающимся отслоением и пузырением лакового покрытия. Пузыри оказываются наполненными влагой и создают канал проводимости изоляции (рис. 6.1).

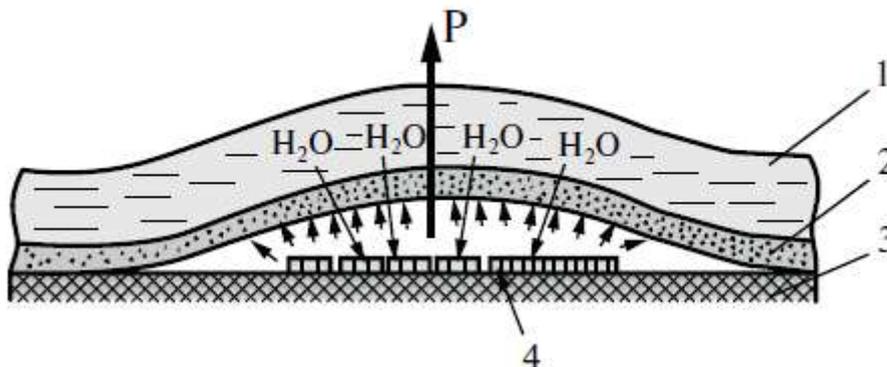


Рис. 6.1. Осмос. Растворы загрязнений под пленкой лака создают осмотическое давление, заставляющее лак отслаиваться

6.6. Проверка правильности выбора припоя, флюса, температуры и времени пайки

Правильность выбора условий пайки для данного металла или металлопокрытия оценивается по растекаемости припоя и по величине краевого угла смачивания. Критерием оценки растекаемости является коэффициент K_p , равный отношению площади, занятой припоем после расплавления и растекания, – S_p к площади, занимаемой дозой припоя до его расплавления – S_0 : $K_p = S_p/S_0$.

На образец листового металла или образец с металлопокрытием размером 25x25x1 мм помещают пластинку испытываемого припоя толщиной 0,3 мм и диаметром 8 мм, смачивают испытываемым флюсом и помещают на зеркало какого-либо расплава, нагретого до температуры, заданной условиями пайки. В качестве расплава используется какая-либо соль или легкоплавкий сплав. Время пребывания образца наплаву зеркала расплава определяется суммой временем пайки (3 с) и времени прогрева образца от температуры зеркала расплава до верхней поверхности образца: металлического – 2...3 с, фольгированного диэлектрика толщиной 1 мм – 5...6 с, толщиной 1,5...2,0 мм – 8...10 с.

Если $K_p \geq 0,9$, выбор режимов пайки, флюса и припоя сделан правильно. Если $K_p < 0,9$, пайка будет затруднена.

Определение краевого угла смачивания производят на таких же образцах, изготовленных из исследуемого материала. Но вместо дозы припоя используют проволоку диаметром 0,5...0,8 мм длиной 15...20 мм, предварительно облуженную испытываемым припоем. Отрихтованный кусок проволоки укладывают на плоский образец и продельывают те же процедуры, что и при определении K_p . После формирования паяного шва образец снимают с зеркала расплава, остужают и делают срез образца перпендикулярно оси проволоки. Шлифуют срез и на инструментальном микроскопе измеряют краевой угол смачивания. Если угол смачивания $\sigma < 30^\circ$, режимы пайки, припой и флюс выбраны правильно. Если $\sigma > 30^\circ$, пайка будет затруднена.

6.7. Вопросы для самопроверки

1. Какие требования предъявляются к флюсам?
2. В чем заключается механизм действия флюса?
3. Какие типы флюсов вы знаете?
4. Как проверить правильность выбора припоя, флюса, температуры и времени пайки?

7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

Изучение непаяльных методов неразъемных соединений

Цель работы. Изучить непаяльные методы неразъемных соединений, а также области использования различных методов соединений в современной электронной аппаратуре.

7.1. Принципы непаяных соединений

Непаяльные методы соединений достаточно распространены. В автомобильной электронике, в прокладке сетей, в вычислительной технике используют методы обжима контактов, в экспериментальных лабораториях активно используют быстро сменяемые условно неразъемные соединения для создания макетов.

Наиболее распространенные непаяные соединения: соединения скручиванием и намоткой, под зажим, соединения обжатием (самое распространенное).

К группе непаяных соединений относят все неразъемные соединения, образующиеся за счет холодной деформации стыков соединяемых элементов. Усилия вдавливания этих элементов друг в друга с образованием герметичной зоны металлического контактирования – обязательное условие образования прочного и надежного соединения.

В силовой электронике, в электротехнических сетях непаяные соединения широко распространены: практически все силовоточные соединения выполняются или скрутками, или зажимом под винт. Алюминиевые провода, имеющие прочную окисную пленку, скручивают только в высоковольтных силовоточных линиях. В этих условиях в линии достаточно напряжения и мощности, чтобы окисная пленка пробилась, а зона контакта оплавилась с образованием сварного соединения.

Для слаботочной аппаратуры, где малые токи и напряжения не способны улучшить «плохой» контакт, электрические соединения изначально не должны иметь разделительных слоев из окислов и загрязнений. Это достигается холодной пластической деформацией стыков соединений, так что при этой деформации пленки окислов раздвигаются, обнажая чистый металл. Такое состояние сжатия должно удерживаться, чтобы обеспечить герметичность (газонепроницаемость) стыков для предотвращения окисления и нарушения металлической проводимости.

Общие преимущества всех непаяных соединений состоят в следующем:

- отсутствие необходимости в нагреве для образования соединения, что является в ряде случаев решающим преимуществом;
- коррозионная стойкость за счет герметичности контакта;
- экономичность;

- простота ремонта – не нужен нагрев;
- гигиеничность в производстве (нет ни флюсов, ни припоев);
- высокая надежность.

Сравнительные характеристики некоторых типов соединений для равных условий эксплуатации, ч⁻¹:

соединения накруткой	10-13
соединения обжатием	10-11
паяные соединения	10-10 (ручная пайка)
соединения микросваркой	10-9

Наиболее характерным для непаяных соединений с точки зрения разрешения проблем надежности являются соединения методом накрутки.

7.2. Монтаж соединений накруткой

Монтаж накруткой предназначен для получения электрических соединений с помощью одножильных проводов и штыревых выводов. Он был разработан в начале 50-х годов прошлого века в США и достаточно широко применяется для электрического монтажа блоков, панелей и рам. Монтаж накруткой:

- исключает применение припоев и флюсов;
- повышает надежность соединений по сравнению с паяными при механических и климатических воздействиях;
- ускоряет процесс электрического монтажа аппаратуры;
- создает условия для его автоматизации.

7.2.1. Контактное соединение накруткой

Контактное соединение накруткой – соединение неизолированного провода (участка провода) с выводом, имеющим острые кромки, при котором провод навивается на вывод с определенным усилием (рис. 7.1). Электрический контакт возникает в зонах контакта провода с острыми кромками вывода (рис. 7.2). Натяжение провода при накрутке позволяет разрушить пленку оксидов на контактирующих металлах, способствует вдавлению провода в острые кромки вывода и образованию газонепроницаемого соединения (рис. 7.3). Возможно соединение накруткой с применением провода с тонкой изоляцией. Тогда изоляция прорезается острыми кромками вывода. Концентрация напряжения в зонах контакта и среднее давление порядка 700 МПа обуславливают взаимную диффузию металлов.

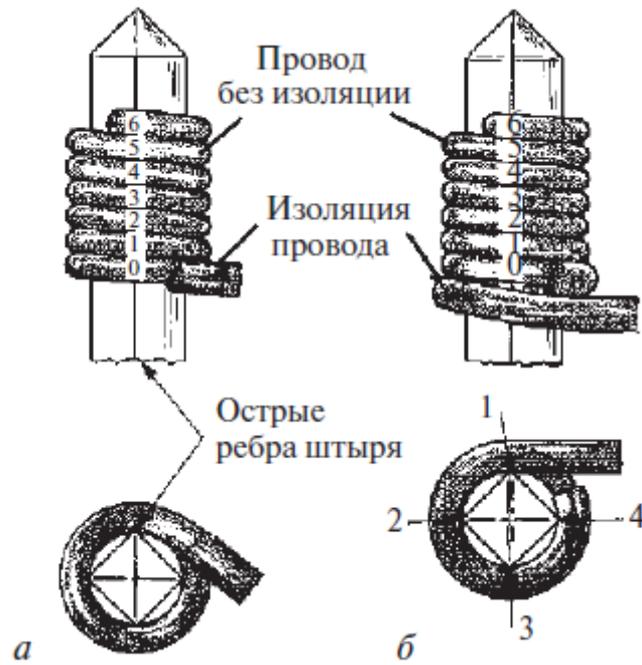


Рис. 7.1. Соединение накруткой провода на хвостовик разъема:
а – регулярная накрутка; *б* – модифицированная накрутка

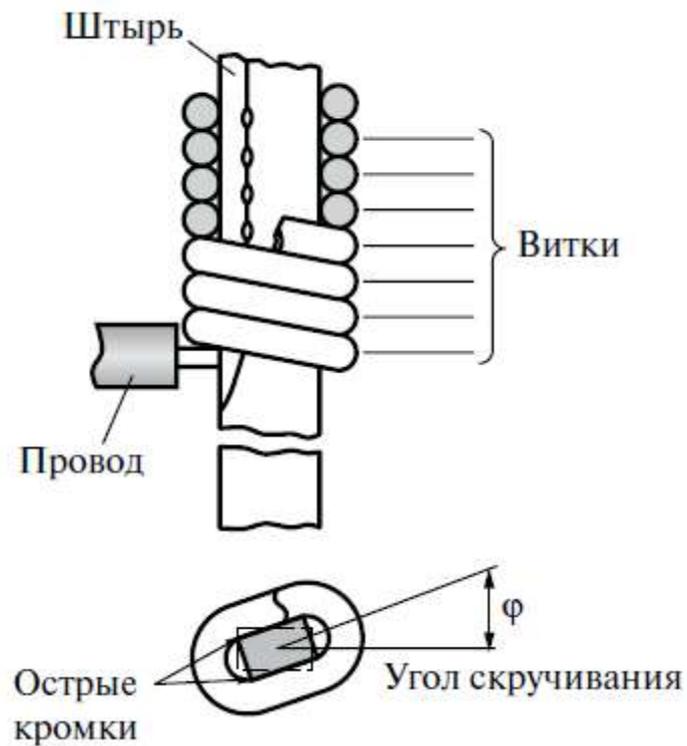


Рис. 7.2. Деформации в накрутке

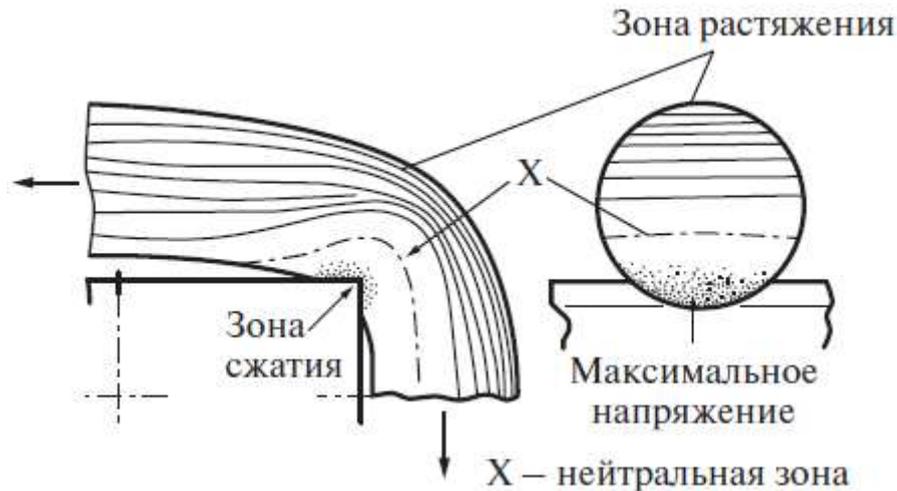


Рис. 7.3. Напряжения и деформации в зоне сжатия провода в накрутке. Давление провода раздвигает окислы, образуется газонепроницаемый металлический контакт

Соединение накруткой должно удовлетворять следующим требованиям:

- минимальные номинальное и переходное сопротивления;
- газонепроницаемость для исключения коррозии;
- сумма площадей зон контакта должна быть больше поперечного сечения провода;
- электрическая стабильность во времени при механических и климатических воздействиях.

Эти требования обеспечиваются выбором соответствующих материалов вывода и провода, конструкцией соединения и технологическими условиями его получения.

Материал вывода должен обладать достаточной пластичностью для образования поверхностей контакта в результате деформирования острых кромок. Необходима определенная упругость и прочность вывода для сопротивления скручиванию его в процессе навивки провода. От состояния поверхностного слоя материала зависят электрические параметры соединения. Для изготовления выводов применяют медь, латунь, плакированную сталь, никелево-серебряные сплавы, бериллиевую и фосфористую бронзы. Последние имеют наилучшие физико-механические свойства:

- высокий модуль упругости;
- низкое остаточное напряжение;
- коэффициент линейного расширения, близкий к коэффициенту линейного расширения медного провода.

На выводы наносят покрытия из серебра, золота, олова или сплава олово-свинец, предохраняющие поверхности от окисления, способствующие процессу диффузии металлов и определяющие значения переходного сопротивления.

Выводы из латуни и бронзы, предназначенные для специальной электронной аппаратуры, гальванически покрывают золотом (3...6 мкм) с предварительным серебрением (9...12 мкм). Применяют серебрение (6...9 мкм) по никелевому покрытию (1...3 мкм). Для обычной аппаратуры выводы получают из меди с покрытием оловом или сплавом олово-свинец толщиной не более 35...40 мкм.

В качестве провода для накрутки используют медный одножильный провод, имеющий относительное удлинение не менее 20%. Рабочий участок провода освобождается от изоляции и облуживается. Кроме меди используют латунь, никелевое железо и никелевую проволоку.

Для равнопрочности элементов соединений необходимо обеспечить равенство суммы площадей контакта провода со штырем и площади поперечного сечения провода. Это, как правило, обеспечивается 16...20 точками контактирования в зависимости от диаметра провода. Следовательно, соединение должно быть многовитковым.

Следует указать, что соединение, состоящее из 5...6 витков луженого медного провода, навитого на вывод из фосфористой бронзы с золотым или серебряным покрытием, имеет номинальное сопротивление 0,001...0,003 Ом. После электрических, механических и климатических испытаний оно увеличивается не более чем на 0,001 Ом. Переходное сопротивление контакта в накрутке составляет 0,0004...0,0008 Ом и после испытаний изменяется по закону, близкому к закону нормального распределения.

Большое значение в обеспечении электрической и механической стабильности соединения имеет процесс диффузии контактирующих металлов.

Напряжение в навитом проводе снижается в процессе эксплуатации на 20...50% в зависимости от температурного воздействия. Диффузия металлов покрытия увеличивает механическую прочность и обеспечивает сохранение электрических параметров соединения во времени. Срок службы соединения накруткой при нормальных климатических воздействиях 15...20 лет.

7.2.2. Современное применение накрутки

Сегодня накрутка широко используется для реализации переменной части монтажа на унифицированных платах, когда нужно создавать модификации изделий за счет добавления связей к общей для всех модификаций массе соединений. Доля соединений, добавляемых накруткой, в этом случае не превышает 10%.

Соединения накруткой могут также успешно применяться и для изготовления паяных соединений, т.е. оплаиванием накрученного провода. На одном штыре можно также разместить и паяное соединение многожильно-

го провода, и накрученный одножильный провод (рис. 7.4). Пайка по понятным соображениям должна предшествовать накрутке.

Соединения накруткой хорошо сочетаются с технологией впрессовыванием штырей в отверстия. Тогда монтаж вообще обходится без процессов пайки или сварки. Крупные коммутационные блоки и стойки аппаратуры связи монтируются именно таким образом.

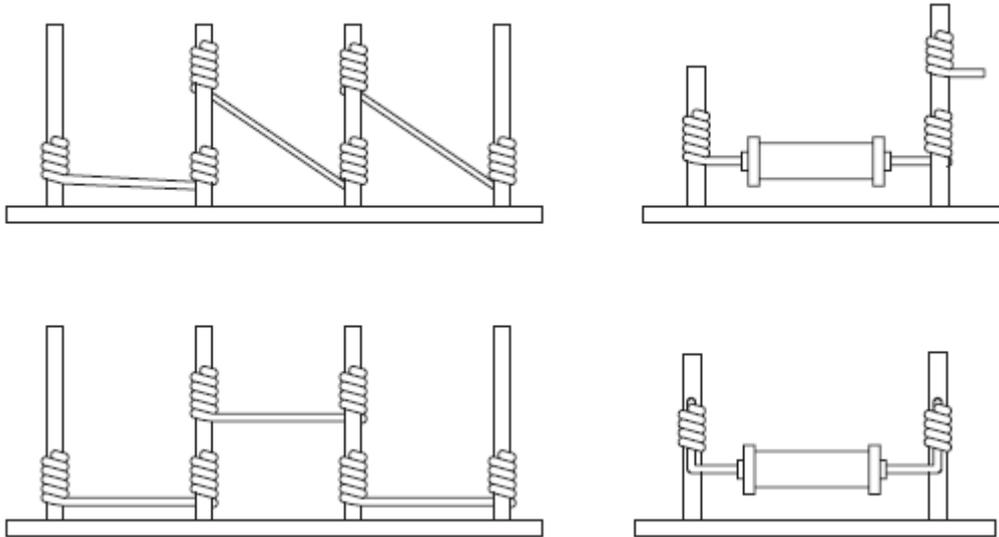


Рис. 7.4. Разнообразие разводки проводов при выполнении соединений накруткой

7.3. Соединение скручиванием и намоткой

Старым, но успешно используемым еще поныне способом обеспечения электрического контакта является скручивание концов проводов со снятой изоляцией способами, показанными на рис. 7.5. Это самое простое и самое доступное соединение, не обладающее большой надежностью, но не требующее специальной оснастки для его выполнения.

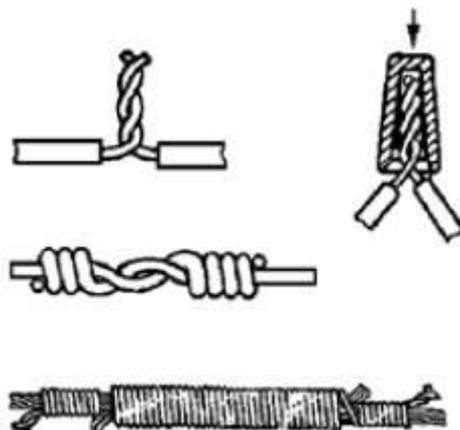


Рис. 7.5. Соединения методом скруток

Этот способ в основном используется в телефонии и высоковольтной промышленности для соединения оголенных проводов в высоковольтных линиях передач. Однако расширяющееся использование алюминиевых проводов с прочной окисной пленкой делает соединение скручиванием ненадежным.

7.4. Винтовое соединение

В соединениях под винт усилие сжатия возникает при затяжке винта. Возникающая в винтовых соединениях запас упругости обеспечивает необходимое усилие для того, чтобы контактная поверхность не снизилась ниже определенного значения, при котором соединение теряет газостойкость.

Винтовым способом можно соединять и алюминиевые провода, поскольку окисные пленки под вращающимся винтом разрушаются и герметизируются.

Как и в любом соединении, необходимо упругой частью деформации сжатия предотвратить релаксацию (текучесть) материалов конструкций. Поэтому целесообразно использовать соединительные элементы, изготовленные из фосфористой бронзы или твердой латуни.

7.5. Зажимное соединение сжатием («термипойнт»)

Этот тип соединений был разработан фирмой Aircraft Marine Products (AMP) в начале 60-х годов прошлого века. Этим методом провода закрепляют в начале и конце соединения (Termination from point to point). Соединение образуется защемлением провода на штыре специальной клипсой – зажимом (рис. 7.6).

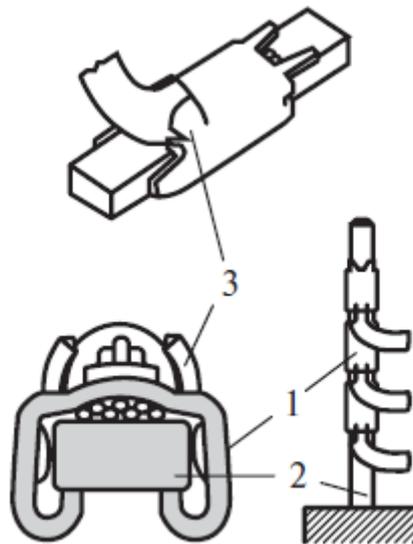


Рис. 7.6. Соединение типа «термипойнт»

Пружинные захваты зажима прижимают провод к штырю с силой около 200 МПа. Поэтому соединение, имеющее относительно небольшую поверхность контактирования, газонепроницаемо и механически устойчиво.

Производительность метода в полуавтоматическом режиме 400...500 соединений в час.

7.6. Соединение с помощью спиральной пружины

Спиральная пружина пригодна для быстрого соединения проводов без снятия изоляции. Соединительный элемент представляет собой спиральную пружину квадратного сечения, изготовленную из фосфористой бронзы (см. рис. 7.7).

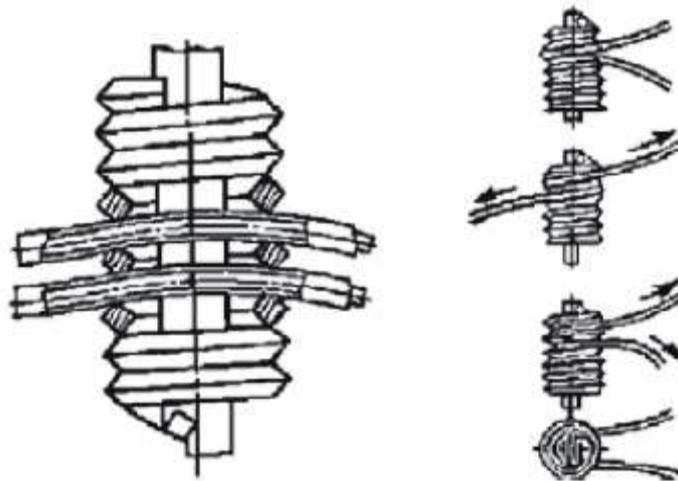


Рис. 7.7. Схема соединения с помощью спиральной пружины

Спираль пружины скручивают таким образом, чтобы ее витки поджимались друг к другу. Провода, предназначенные для соединения, продевают между витками. Острые грани витков прорезают изоляцию провода и сдирают окисную пленку, обеспечивая металлический контакт.

К одной и той же пружине могут быть присоединены провода различных диаметров. Витки пружины удерживают провода под постоянным сжатием. Каждый конец провода имеет контакт с пружиной в четырех точках, что обеспечивает надежность соединения.

7.7. Клеммное соединение прижатием

Провод задвигается в позолоченную соединительную трубку и прижимается там к внутренней стороне трубки овальной пробкой, поджимаемой пружиной. Для продвижения провода в трубку пробку отжимают с

помощью инструмента, похожего на притупленное шило, а затем отпускают, чтобы она зажала провод (см. рис. 7.8, *а*).

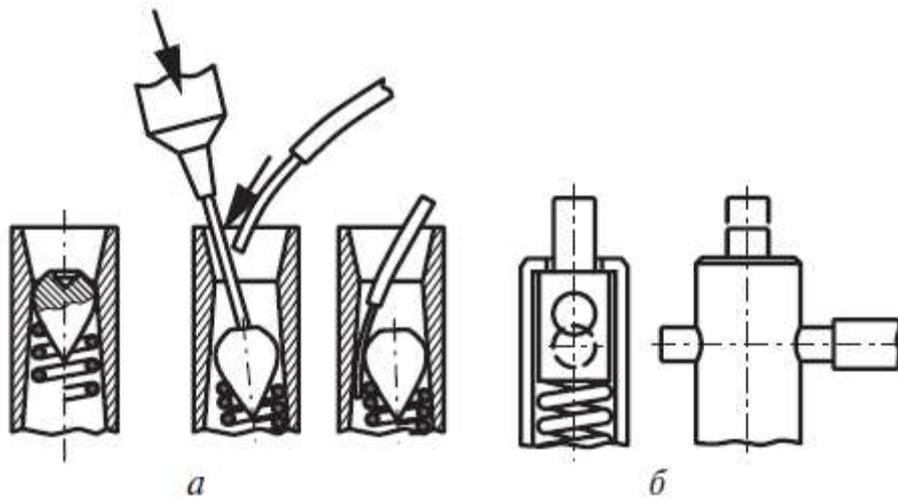


Рис. 7.8. Клеммное соединение: *а* – штекерное соединение; *б* – соединение пружиной сжатия

Другое соединение с помощью пружины сжатия уже давно используют для быстрого закрепления проводов в приборных клеммах (рис. 7.8, *б*).

Зажим и извлечение провода производятся нажатием кнопки. Деформация провода относительно невелика.

Эти типы соединений относятся к разъемным соединениям.

7.8. Соединения обжатием

С помощью этого постоянного соединения обычно соединяют провода со всевозможными наконечниками (рис. 7.9). В высокоточной аппаратуре, в автомобильной бортовой сети этот метод применяется уже давно.

В электронной аппаратуре его стали применять 10...15 лет назад, в основном в цепях питания, заземления, сетевого ввода.

Сущность метода состоит в том, что провод обжимается полый втулкой так, что благодаря сильному давлению соединяемые металлы подвергаются значительной пластической деформации и вследствие холодной текучести контактирующих поверхностей между ними возникает металлический контакт (рис. 7.10). Упругая остаточная деформация сжимает контактные поверхности настолько сильно, что такое соединение обладает высокой проводимостью, газостойкостью, а после насаживания на место соединения термоусаживаемой электроизоляционной трубки – еще и хорошей вибростойкостью.

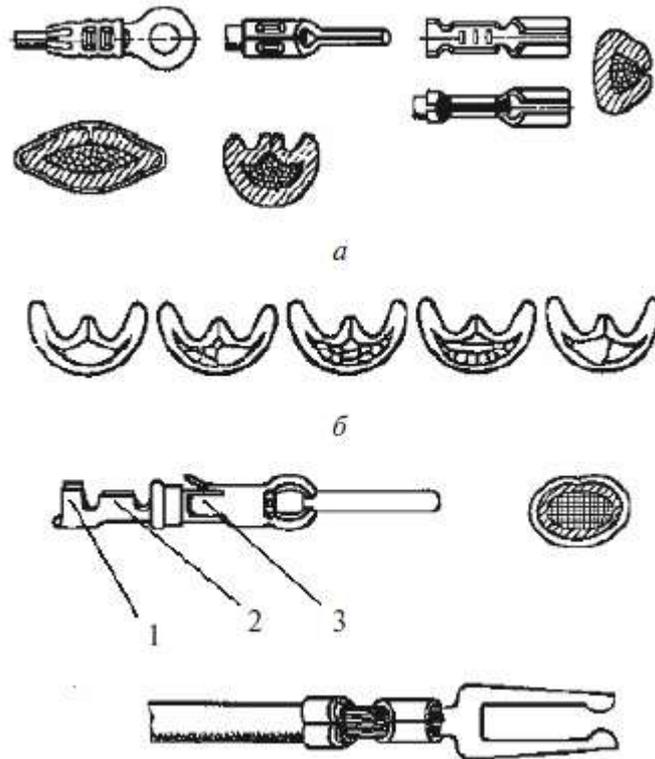


Рис. 7.9. Соединения обжатием: *а* – обжатие проводов в наконечниках; *б* – формы обжатия; 1 – лапка для захвата оболочки; 2 – лапка для захвата и обжатия провода; 3 – фиксирующая пружина (гарпун)

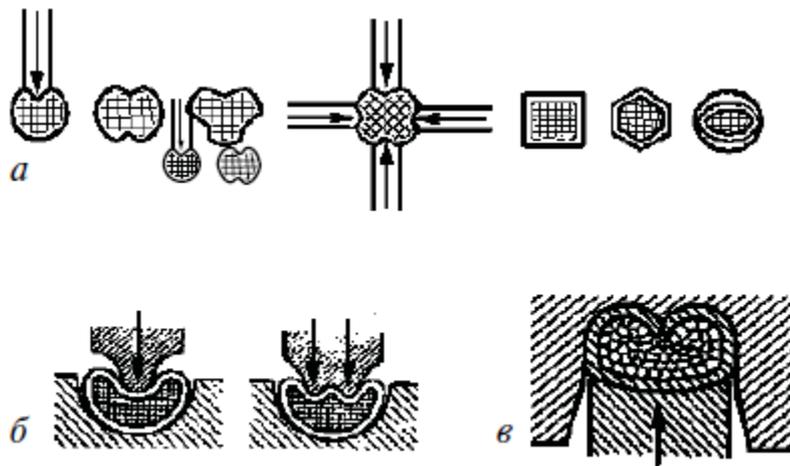


Рис. 7.10. Способы обжатия: *а* – многостороннее обжатие; *б* – обжатие сплющиванием; *в* – двойная обжимка

7.9. Эластичное соединение («зебра»)

Это разъёмное соединение с нулевым усилием сочленения осуществляется через «островки» эластичного проводящего полимера (резины).

Главный его недостаток – большое электрическое сопротивление (10...100 Ом). Но ряд устройств и не требует малоомных соединений: дисплеи (например, в электронных часах), сенсорные панели, контакты с электростатическими стоками и т.п. Известны эластичные контактные элементы, выполненные в виде шариков (рис. 7.11) или вырезанные из многослойных пластин чередующихся слоев саженаполненной и непроводящей резины (рис. 7.12). Эластичные контакты особенно хороши, когда нет гарантий ровности рельефа контактирующих поверхностей, своей эластичностью они компенсируют эти неровности.

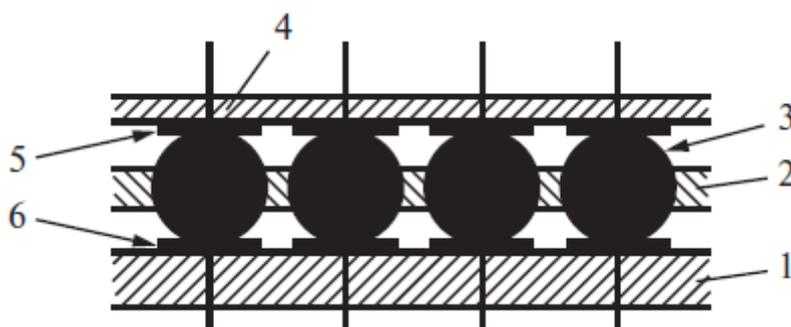


Рис. 7.11. Соединения через токопроводящую резину («зебра»):
1 – монтажная подложка (печатная плата); 2 – держатель токопроводящих элементов; 3 – токопроводящие резиновые элементы; 4 – компонент;
5 – контактное поле компонент; 6 – контактное поле подложки

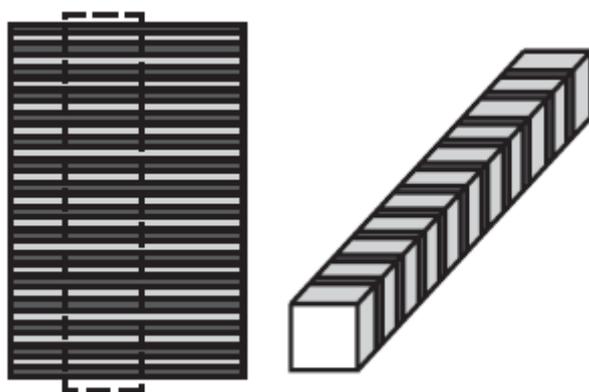


Рис. 7.12. Схема изготовления разъема типа «зебра»: многослойная спрессованная структура из чередования слоев токопроводящей резины и непроводящей; брусок, вырезанный из многослойного листа резины, – эластичный разъем «зебра»

7.10. Соединения врезанием

Этот вид соединений можно видеть на плоских многопроводных кабелях (рис. 7.13), когда к ним нужно присоединить разъем. Ножи этого разъема при надвигании их на кабель прорезают изоляцию проводов плос-

кого кабеля и фиксируются на жилах проводов. Шаг ножей разъема должен совпадать с шагом проводов плоского кабеля.

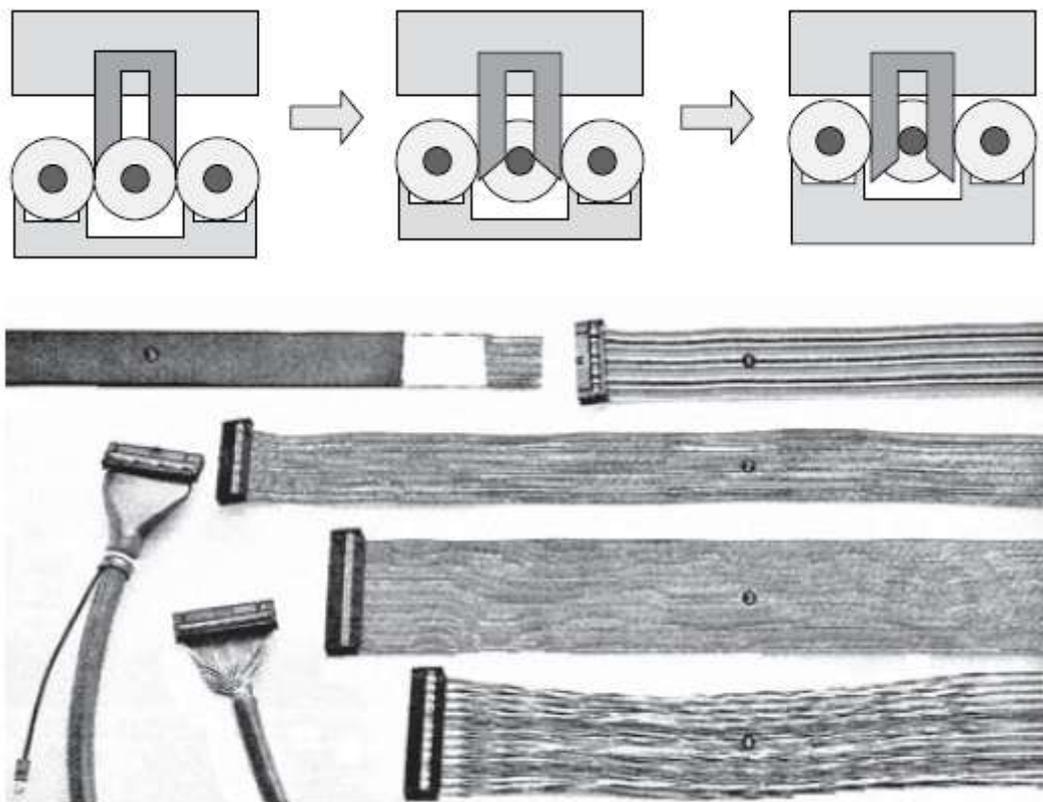


Рис. 7.13. Соединения врезанием разъемов на плоские кабели

5.13. Выводы

Контактирование как результат всевозможных методов соединений может рассматриваться как динамический процесс. Контактирование производится посредством постоянного внешнего воздействия, при этом из-за допусков изготовления в каждом соединении перед контактированием существует различное исходное состояние. Процессом контактирования должен достигаться требуемый постоянный конечный результат в форме паяного и сварного соединения или холодной деформации контактирующих поверхностей.

Однако это возможно только тогда, когда контактная система, состоящая из вывода компонента, контактной площадки, диэлектрика и поверхностного слоя, несмотря на различное исходное состояние в соединяемых изделиях, может получить относительно стабильное конечное состояние.

При пайке процесс контактирования начинается с того, что слой припоя на одном или обоих соединяемых металлах разогревается под влиянием подведенной энергии. Если температура достигает точки плавления припоя или превышает ее, то слои припоя расплавляются и перемешива-

ются. Жидкий припой собирается при этом в области между выводом компонента и печатной платой и образует на стороне выводов компонента галтель, так как этим распределением припоя достигается минимальная поверхностная энергия.

Стабильность расплава может сразу нарушиться, если один или оба соединяемых изделия расплавятся сами. При подведении энергии существует резервная область, которая, безусловно, необходима для надежного применения метода пайки. Если не принимать во внимание возможные металлургические и другие процессы, то при постоянном подводе энергии допустимая продолжительность существования расплава при пайке значительно больше, чем время, которое минимально необходимо для создания паяного соединения. Этот факт является основой для высокой надежности, достигаемой при методе пайки.

При сварке (по сравнению с пайкой) возникают другие условия. Так как изготовленное соединение имеет высокую прочность, то необходимо расплавление, которое распространяется на всю ширину вывода компонента и длина которого составляет несколько ширин вывода компонента. При данных условиях невозможно локальное оплавление только части поперечного сечения вывода. Напротив, расплавляется преобладающая часть, в общем, все поперечное сечение. Энергия может подводиться не прямо на место соприкосновения между выводом компонента и печатной платой, т.е. на место, где собственно должно происходить расплавление, а на другую поверхность, лежащую вне соединяемой пары. Эта часть расплавляется сначала и изменяет под влиянием поверхностного натяжения свою геометрию. К этой части, лежащей вне соединения, принадлежит, например, край контактной площадки на печатной плате, расположенный вне поверхности соприкосновения между выводом компонента и контактной площадкой. Он образует после расплавления утолщение сплава и смачивает при дальнейшем сужении вывод компонента. Благодаря теплопроводности постепенно повышается температура на поверхности соприкосновения соединяемой пары, так что даже там наступает расплавление. Поперечное сечение соединяемой пары в зоне расплава часто чрезмерно уменьшается, что может приводить к потере прочности соединения.

Основное различие с пайкой состоит в том, что состояние расплавленной зоны при сварке не является стабильным. Особенно нежелательно оно изменяется при дальнейшем подводе энергии к месту сварки. Эта нестабильность при сварке расплавлением в технике микроконтактирования имеет следующие причины:

- вследствие высокой плотности энергии, необходимой для микро-сварки, образуется резкий перепад температуры в материале;
- из-за процесса теплопроводности расплавленная зона всегда длиннее;

- поверхностное натяжение стремится так оформить расплавленную зону, чтобы получилась минимальная поверхность;

- изменение формы и наплывы материала при этом происходят в более нагретом месте;

- благодаря поднятию температуры в расплавленной зоне текучесть сплава больше, из-за чего лучше действует поверхностное натяжение.

Отсюда вытекает, что допустимая продолжительность существования расплава при сварке значительно меньше, чем при пайке.

Наряду с точным соблюдением времени микросварки и энергии, подводимой к месту соединения, надежность метода при применении метода микросварки для контактирования выводов компонента на печатные платы определяется в большей степени допусками соединяемой пары, которые очень сильно сужают область параметров. Поэтому при контактировании компонентов на печатные платы не применяют чистые методы микросварки. Если условия эксплуатации узла требуют сварки, то выводы компонентов связываются с контактными площадками печатной платы с помощью сварки с параллельным зазором.

Соединения, выполняемые запрессовкой, обладают высоким уровнем надежности, способным конкурировать с паяными соединениями. При этом они лишены тех проблем, которые традиционно сопровождают процессы пайки. Данные соединения сравнительно просты в реализации, требуют минимального комплекта оборудования и отличаются экономической эффективностью, экологичностью и ремонтпригодностью.

Непаяльные методы соединений вообще никак не связаны с нагревом и потому меньше травмируют печатную плату. Это особенно важно для многослойных печатных плат, которые «страдают» слабой прочностью внутренних межсоединений. Любой нагрев металлизированных отверстий МПП вызывает термомеханические напряжения во внутренних межсоединениях, последствия которых малопредсказуемы с точки зрения обеспечения большой надежности электронной аппаратуры.

Количественные показатели надежности непаяльных методов соединений паяных или сварных. Но все они, кроме прессовых, занимают большой объем, и потому их применение в бортовой аппаратуре ограничено.

Сложилась следующая иерархия использования различных методов соединений в современной электронной аппаратуре:

- а) печатные платы монтируют в индивидуальном производстве – настольными ручными методами с использованием паяльных станций, в серийном производстве – групповыми методами нагрева: пайкой волной припоя, в печах с конвекционным или ИК-нагревом, конденсационной пайкой и др.;

- б) монтаж разъемов на панели – впрессовыванием хвостовиков контактов в металлизированные отверстия платы панели (метод Press-Fit), переменную часть соединений – накруткой;

в) для соединения панелей с лицевыми панелями прибора – соединениями гибкими проводами с использованием метода «термпойнт»;

г) силовые провода и внешние соединения блоков питания с поперечным сечением больше $1,5 \text{ мм}^2$ целесообразно монтировать методом обжатия хвостовиков клемм с последующим их привинчиванием к силовым контактными элементами;

д) объемный монтаж внутри блока с использованием «накидных» разъемов может выполняться методом обжатия или пайкой;

е) соединения на термопластичных подложках, не терпящих нагрева, – токопроводящими пастами;

ж) соединения стеклянных дисплеев с монтажной подложкой – переходниками типа «зебры»;

з) временные, часто меняющиеся соединения – зажимными типами: клеммы, спирали, винтовые соединения и т.д.;

и) концевые соединители плоских кабелей – методом врезания и т.д.

Постоянное движение к микроминиатюризации обуславливает поиск новых методов, сочетающихся с уменьшающимися размерами электронных изделий.

7.12. Вопросы для самопроверки

1. Назовите преимущества непаяных соединений.
2. Как выполняется контактное соединение накруткой?
3. Каким требованиям должно удовлетворять соединение накруткой?
4. Как выполняется соединение сжатием?
5. Как выполняется соединение с помощью спиральной пружины?
6. Как выполняется клеммное соединение прижатием?
7. В чем заключается метод соединения обжатием?
8. В чем заключается метод соединения врезанием?
9. Укажите области использования различных методов соединений в современной электронной аппаратуре.

8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

Изучение технологии поверхностного монтажа

Цель работы. Изучить технологию поверхностного монтажа компонентов на печатных платах.

Современные технологии сборки и монтажа основаны преимущественно на принципах установки и пайки компонентов на поверхность (рис. 8.1, а). Технологию поверхностного монтажа коротко обозначают аббревиатурой SMT (Surface Mounted Technology). Компоненты, предназначенные для SMT-технологий, обозначаются аббревиатурой SMD (Surface Mounted Device). В отличие от прежних технологий (рис. 8.1, б) монтажа выводов компонентов в металлизированные отверстия (PTH – Plated Through Hole), поверхностный монтаж позволяет достичь большей степени автоматизации, более высокой плотности монтажа, уменьшить объем, снизить стоимость работ и повысить технические характеристики изделий. Объем (соответственно и масса) SMD-компонентов гораздо меньше, чем у PTH-компонентов (рис. 8.2) с разницей вплоть до 90%.

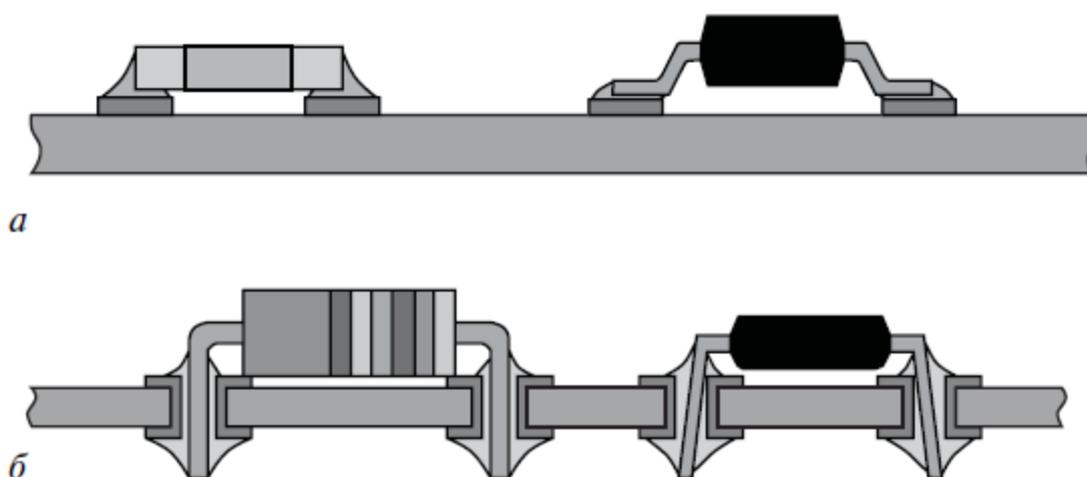


Рис. 8.1. Схемы установки и монтажа компонентов на печатные платы:
а – поверхностный монтаж (SMT-монтаж); *б* – монтаж выводов в отверстия (PTH-монтаж)

Расширяющиеся или вновь создающиеся производства электронных модулей встают перед вопросом выбора оптимальной конфигурации технологической линии: модулей сборки (установки электронных компонентов), пайки, контроля, исправления производственных дефектов, сертификации производства. При этом выборе используются известные критерии оптимизации: максимальная производительность, минимальные капитальные вложения, возможность быстрой перенастройки линии при переходе с одного типа модуля на другой, способность реализации модулей с разно-

образными схемами сборки, технологическое обеспечение качества и надежности.

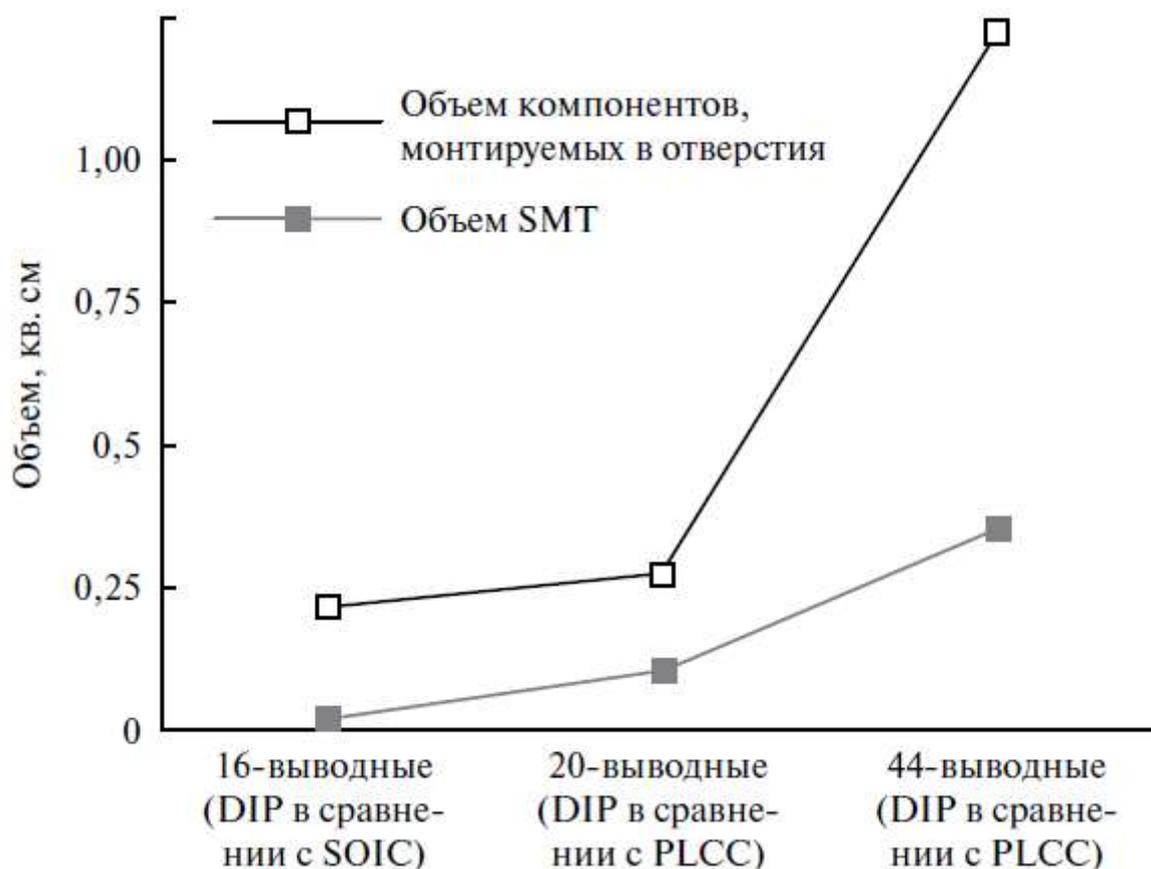


Рис. 8.2. Сравнение объемов SMT и PTH-компонентов

8.1. Поверхностно монтируемые изделия (SMD-компоненты)

Применительно к поверхностному монтажу существуют почти все типы компонентов: конденсаторы, резисторы, транзисторы, диоды, катушки индуктивности, интегральные схемы и разъемы.

8.1.1. Чип-резисторы

Чип-резистор – наиболее простой SMD-компонент (рис. 8.3). Он состоит из прямоугольной керамической подложки с торцами, металлизированными обычно покрытием серебро-палладий (Ag-Pd). Резистивная паста, как правило, на основе диоксида рутения (RuO_2) по толсто пленочной технологии наносится через трафарет между выводами и подвергается обжигу. Далее резистивная пленка покрывается защитной свинцово-боросиликатной стеклянной пленкой. Барьерный подслои никеля обычно используется для предотвращения потери паяемости в случае растворения металлизации Pd-Ag. Торцы облуживаются припоями олово-свинец или

олово-свинец-серебро, чтобы гарантировать долговременное сохранение паяемости. Наиболее широко используются компоненты с типоразмерами 1206 (0,120 дюйма (длина) x 0,060 дюйма (ширина) и 0805. Расширяется применение чип-компонентов 0603 и 0201. В настоящее время наименьший типоразмер – 01005, такие компоненты нашли применение в слуховых аппаратах и мобильных телефонах.

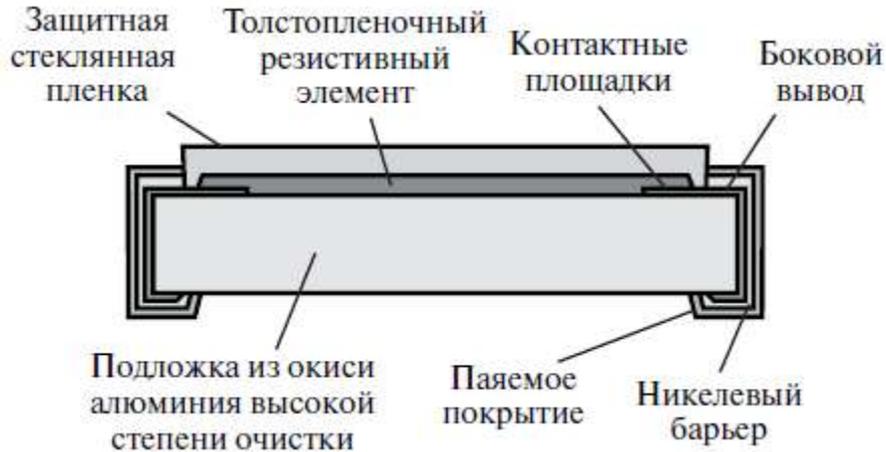


Рис. 8.3. Чип-резистор

8.1.2. Резисторы MELF

Резисторы типа MELF (Metal electrode face resistors – резисторы с жесткими торцевыми выводами) подобны цилиндрическим резисторам типа МЛТ, но гибкие выводы у них замещены головками из платинита, как показано на рис. 8.4.



Рис. 8.4. Резистор MELF

Производство таких резисторов дешевле, чем толстопленочных чип-резисторов. По этой причине они широко используются в промышленности ЮВА (Юго-Восточная Азия), ориентированной на производство бытовой электроники. Однако, так как для резисторов MELF высока вероятность скатывания с контактных площадок во время пайки, их популярность постепенно снижается.

8.1.3. Чип-конденсаторы

Наиболее широко используемые в технологии поверхностного монтажа чип-конденсаторы – это многослойные керамические конденсаторы, состоящие из нескольких слоев металлических электродов, разделенных слоями керамического диэлектрика (рис. 8.5). Требуемая емкость конденсатора обеспечивается соответствующим количеством слоев. Конструкция торцевых выводов подобна той, что и в чип-резисторах. Чип-конденсаторы группируют по удельной емкости и термостабильности:

- с высокой температурной стабильностью и низкой емкостью на основе оксида титана (TiO_2);
- со средней температурной стабильностью и средней емкостью на основе титаната бария ($BaTiO_3$) и другие типы сегнетоэлектриков;
- общего назначения, с наименьшей температурной стабильностью и высокой емкостью на основе сегнетокерамики.

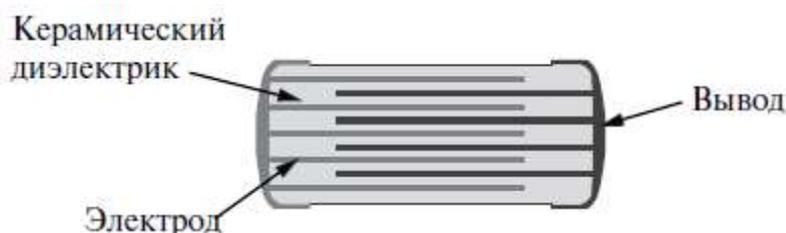


Рис. 8.5. Конструкция многослойного керамического чип-конденсатора

8.1.4. Чип-индукторы

В чип-индуктивностях используется керамический или ферритовый стержень с вертикальной или горизонтальной обмоткой из тонкой медной проволоки в эмалевой изоляции (рис. 8.6). Чип-индуктивность обычно герметизируется эпоксидной смолой.

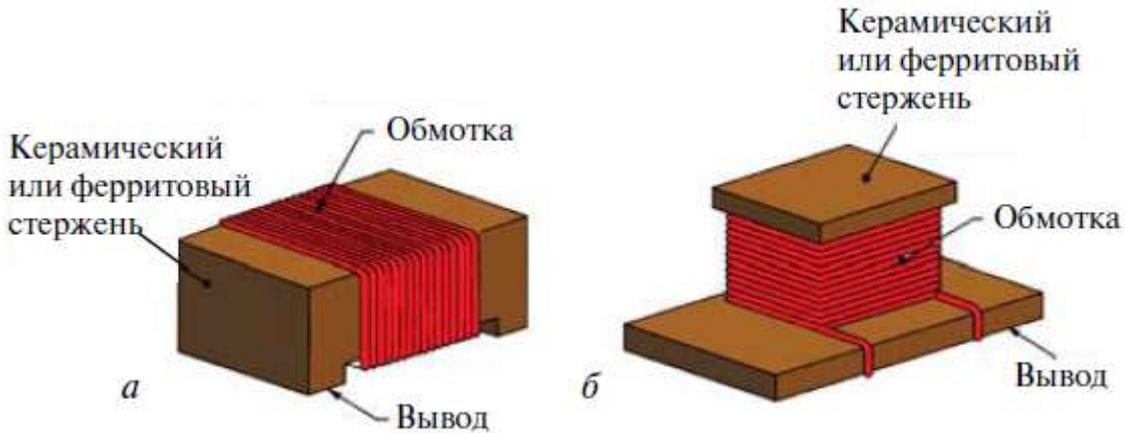


Рис. 8.6. Чип-индукторы: *а* – с вертикальной обмоткой; *б* – с горизонтальной обмоткой

8.2. Технологии пайки при поверхностном монтаже

8.2.1. Пайка волной

Двумя главными технологиями пайки, используемыми при поверхностном монтаже, являются пайка волной и пайка оплавлением. Пайка волной, разновидность пайки в проточном припое, долгое время применялась в эпоху монтажа в отверстия. Как правило, платы со вставленными в отверстия компонентами подвергались предварительному флюсованию с помощью пенного флюсователя, а затем пропускались через одинарную ламинарную волну припоя. Однако этот процесс непригоден для пайки поверхностно монтируемых компонентов. Наличие компонентов на нижней стороне платы служит препятствием для ламинарного потока припоя и, следовательно, приводит к эффекту затенения. Общий признак: выводы с заднего края компонента имели недостаточное количество припоя. Кроме того, непосредственный контакт компонентов на нижней стороне платы с горячей волной припоя также приводит к потенциальной возможности повреждений вследствие термоудара. Для минимизации эффекта затенения используется двойная волна, в которой турбулентная волна предшествует ламинарной (рис. 8.7).

Турбулентная волна обеспечивает смачивание всех выводов, в то время как последующая ламинарная волна удаляет избытки припоя для того, чтобы минимизировать возникновение перемычек припоя между выводами. Потенциальная возможность термоудара снижается путем обеспечения значительного предварительного нагрева перед пайкой волной. Использование двойной волны и надлежащего предварительного нагрева позволяет паять волной компоненты малых размеров. Однако для больших корпусов компонентов и компонентов с малым шагом выводов паяные соединения с дефицитом припоя или возникновением перемычек припоя – все еще проблемы, с которыми приходится считаться.

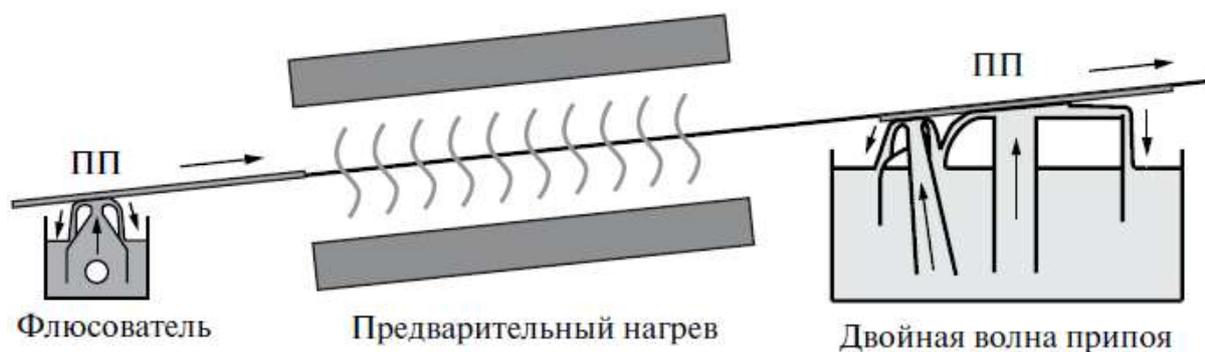


Рис. 8.7. Схематическое изображение процесса пайки волной

8.2.2. Пайка оплавлением

Для того чтобы исключить сложности, имеющиеся при пайке поверхностно монтируемых компонентов волной припоя, в технологиях поверхностного монтажа была освоена и развита пайка оплавлением, при которой порошкообразный припой и флюс предварительно смешиваются для образования паяльной пасты. Реология пасты обычно разрабатывается так, чтобы паста была тиксотропной для облегчения процесса нанесения. Паста наносится на контактные площадки методом трафаретной печати или устройствами дозирования (диспенсером). На пятна пасты устанавливаются выводы компонентов. Клейкая паяльная паста удерживает компоненты на плате, даже если они находятся на ее нижней стороне. Платы с установленными на пасту компонентами нагреваются для расплавления порошкообразного припоя в пасте. При нагреве флюс вступает во взаимодействие и, соответственно, удаляет оксиды с частиц припоя и металлических поверхностей выводов компонентов и контактных площадок и, следовательно, позволяет припою смачивать поверхности выводов компонентов и контактных площадок плат образовывать паяные соединения. Некоторые распространенные методы нагрева при пайке оплавлением включают в себя инфракрасный нагрев, пайку в паровой фазе, конвекционный нагрев, кондукционный (нагретым инструментом) и лазерную пайку.

8.2.3. Преимущества технологии с использованием паяльной пасты при поверхностном монтаже

Паяльная паста – материал, используемый при пайке оплавлением при поверхностном монтаже. Применение технологии с использованием паяльной пасты имеет значительные преимущества перед пайкой волной припоя:

- паяльная паста служит не только материалом для пайки, но и клеем для фиксации компонентов на монтажном поле платы. Это позволяет из-

бежать необходимости использования клея для крепления компонентов, которые необходимы при пайке волной припоя.

- нанесение паяльной пасты обычно осуществляется групповым методом – через металлический или сетчатый трафарет или последовательным дозированием или переносом. Нанесение определенного количества припоя на контактные площадки обеспечивает повторяемость объема припоя в паяных соединениях и, следовательно, устраняет проблемы, связанные с недостаточным количеством припоя в соединениях по причине эффекта затенения, встречающегося при пайке волной припоя. Более того, нанесение предопределенного количества припоя также снижает частоту образования перемычек припоя. Это особенно касается электронных модулей, содержащих компоненты с малым шагом выводов.

- использование пайки оплавлением позволяет обеспечить хорошо управляемый температурный профиль с постепенным нагревом, таким образом, исключая потенциальную возможность повреждения компонентов по причине термоудара, вызываемого пайкой волной.

- применение паяльной пасты предоставляет возможность каскадной пайки припоями с различной температурой плавления. После первой пайки высокотемпературным припоем паяльная паста с меньшей температурой плавления может образовывать полноценные паяные соединения без повторного расплавления паяных соединений, сформированных при первой пайке. Этот прием особенно важен для смешанной технологии пайки обычных компонентов и компонентов с покрытиями для бессвинцовой пайки.

- поведение паяльной пасты при пайке не чувствительно к типу паяльной маски, использованной на печатной плате. При пайке волной припоя паяльная маска с гладкой поверхностью часто бывает причиной образования шариков и перемычек припоя.

Технология поверхностного монтажа делает возможным развитие электронной промышленности в направлении уменьшения размеров, массы, повышения плотности монтажа, быстродействия и снижения стоимости.

Конкурируя с пайкой волной, пайка оплавлением быстро стала основной технологией соединения при серийном производстве благодаря более высокому выходу годных изделий, производительности и надежности. Корпуса с матричным расположением выводов по сравнению с корпусами с периферийным расположением выводов смещаются в сторону более мелкого шага и обеспечивают более высокую плотность выводов вместе с более легким производством, меньшими размерами корпуса и более высокой производительностью. Монтаж их на плату возможен только методами поверхностного монтажа.

8.3. Вопросы для самопроверки

1. Поясните технологию поверхностного монтажа чип-резисторов.
2. Поясните технологию поверхностного монтажа резисторов MELF.
3. Поясните технологию поверхностного монтажа чип-конденсаторов.
4. Поясните технологию поверхностного монтажа чип-индукторов.
5. Поясните технологию процесса пайки волной.
6. Поясните технологию процесса пайки оплавлением.
7. Назовите преимущества технологии с использованием паяльной пасты при поверхностном монтаже.

9. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

Изучение последовательности сборки и монтажа электронных модулей

Цель работы. Изучить последовательность сборки и монтажа электронных модулей, методы нанесения паяльной пасты на контактные площадки плат, а также системы установки компонентов.

9.1. Нанесение паяльной пасты на контактные площадки плат

Стандартно нанесение паяльных паст производится трафаретной печатью. Альтернативой этому процессу является поточечное нанесение капель пасты диспенсером. Но его производительность настолько низка (одна точка в секунду), что трафаретная печать используется в подавляющем большинстве случаев, даже в маломасштабных производствах, если есть возможность изготовления дешевых трафаретов.

9.1.1. Диспенсорный метод нанесения припойной пасты

В прототипном производстве электронных модулей используется диспенсорный метод, в котором используется шприц (рис. 9.1) и устройство нормированного перемещения штока шприца для четкого дозирования пасты припоя.

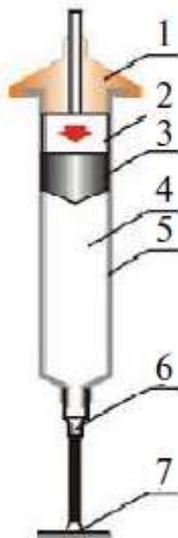


Рис. 9.1. Схема нанесения припойной пасты на контактные площадки с помощью диспенсера: 1 – крышка; 2 – воздух под давлением; 3 – поршень; 4 – припойная паста; 5 – цилиндрический корпус; 6 – сопло; 7 – контактная площадка

Ручная или автоматическая дозировка осуществляется при помощи сжатого воздуха или архимедовой спирали. Паста поступает в виде «капель» непосредственно на контактные площадки печатной платы. Преимуществом диспенсорного метода является высокая гибкость его применения.

К основным преимуществам метода относятся простота переналадки оборудования и отсутствие необходимости изготовления трафарета. Однако этот метод дорогой по сравнению с трафаретной печатью.

В основе метода лежит диспенсер – шприц (рис. 9.1). Под действием сжатого воздуха осуществляется выдавливание пасты через иглу на поверхность контактных площадок печатной платы. Метод применим как для ручного нанесения, так и для автоматического.

Производительность ручной работы для опытных операторов достигает 120 точек в минуту. Производительность автоматического нанесения достигает 500 точек в минуту.

При ручном диспенсорном нанесении возможны два наиболее опасных вида брака:

- неточное дозирование – приводит к замыканиям после оплавления;
- разное количество припойной пасты на контактных площадках одного компонента – приводит к эффекту опрокидывания.

При автоматическом диспенсорном нанесении брак может возникнуть только по вине оператора за исключением отказа оборудования по технически причинам. Наименее вероятный брак – неточность нанесения в пределах погрешности оборудования. Поскольку точность современных установок достаточна (а зачастую и избыточна) для процесса диспенсорного нанесения, погрешность размещения пасты на печатной плате не приводит к браку. Соответственно, брак может возникнуть только из-за неверной программной настройки оборудования по вине оператора.

Техника нанесения адгезивов во многом полностью аналогична нанесению припойных паст (за исключением режимов нанесения). Диспенсорное нанесение адгезивов осуществляется при соотношении диаметра нанесенной точки к ее высоте в диапазоне от 1,5:1 до 5:1. Нужно отметить, что в 90% случаев нанесения адгезивов используются диспенсеры. Производительность автоматических установок достигает 50 000 точек/ч.

Технологические режимы трафаретного нанесения адгезивов (печать заливкой) схожи с трафаретным нанесением паст. Однако используемые для нанесения адгезивов трафареты обычно имеют толщину от 0,15 до 0,20 мм.

После установки компонентов на термоотверждаемый адгезив осуществляется запекание при температуре от 110 до 160 °С.

9.1.2. Трафаретный метод нанесения припойной пасты

Трафаретный метод является наиболее распространенным методом нанесения пасты на плату. Паста при проведении ракелем по поверхности трафарета продавливается через имеющиеся в нем окна на контактные площадки печатной платы. Материалом трафарета может быть сплав никеля, нержавеющая сталь, латунь, бронза, медь и др. Отверстия в трафарете обычно прорезают лазером, протравливают или получают методом гальванопластики.

Техника ручного нанесения пасты несколько потеряла свою актуальность вследствие автоматизации машин для трафаретной печати, однако она достаточно важна для того, чтобы исследовать суть данного метода. Если необходимо овладеть способом трафаретной печати или получить хороший отпечаток с помощью трафарета, то знание техники ручной работы ракелем имеет основополагающее значение, даже если приходится работать с автоматическими печатными машинами или ракельными автоматами. Ракель выполняет следующие функции:

- 1) перемещает припойную пасту;
- 2) заполняет ячей трафарета припойной пастой;
- 3) удаляет избыточную припойную пасту с поверхности трафарета;
- 4) прижимает трафарет к плате в зоне продавливания пасты.

При работе ракелем его следует зажать между большим пальцем и мякотью ладони и перемещать вдоль поверхности трафарета. На рис. 9.2 показан процесс работы ракелем. Наклон ракеля перед обратным ходом устанавливается под углом 45° к поверхности трафарета. Если установить более крутой угол, получится меньшая толщина нанесенного слоя пасты. Последовательность действий при использовании метода трафаретной печати следующая:

- 1) загрузка платы в устройство трафаретной печати;
- 2) нанесение припойной пасты на поверхность трафарета;
- 3) установка ракеля под углом 45° к поверхности трафарета;
- 4) распределение припойной пасты по поверхности трафарета (без оказания давления на ракель под углом 45° к поверхности трафарета);
- 5) продавливание припойной пасты на поверхность печатной платы через окна в трафарете под углом $60...70^\circ$ (при оказании давления на ракель);
- 6) удаление остатков припойной пасты с помощью ракеля;
- 7) изъятие платы с отпечатком из устройства трафаретной печати.

Станки трафаретной печати по принципу действия мало отличаются от аналогичных для полиграфических работ. Но сами трафаретные формы обязательно выполняются из металлических листов. К этому вынуждает большая вязкость паяльных паст и относительно большой размер частиц припоя, не проходящих через ячейки сит. Кроме того, усилия продавлива-

ния через трафарет вязких паяльных паст настолько велики, что даже стальные сита быстро задираются под ракилем и рвутся.

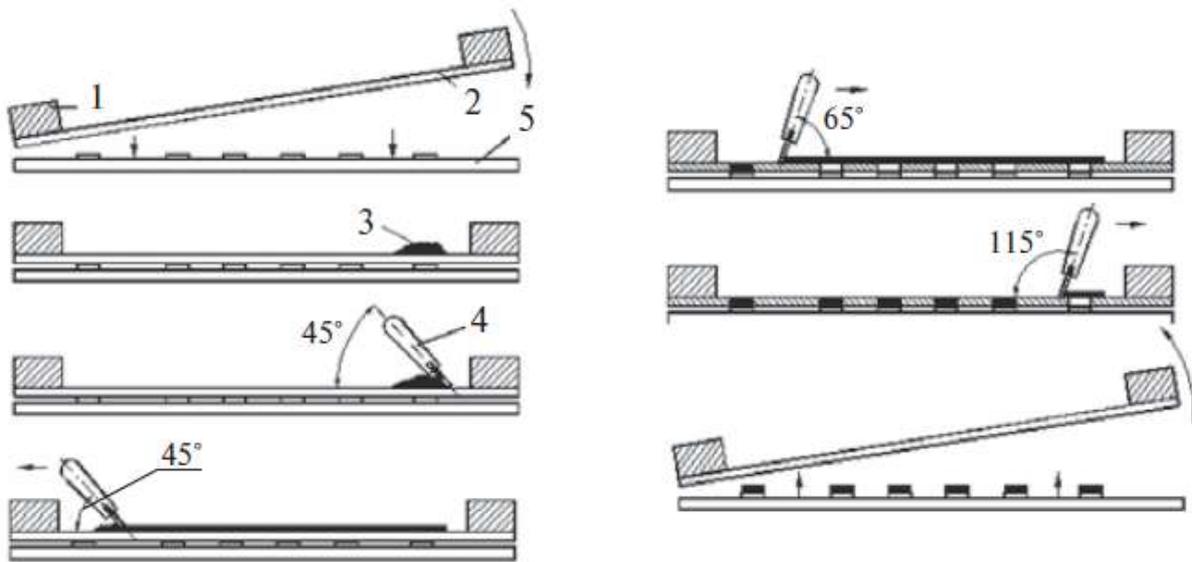


Рис. 9.2. Последовательность операций при трафаретной печати: 1 – рама; 2 – трафарет; 3 – припойная паста; 4 – ракель; 5 – печатная плата

Металлические трафареты изготавливаются лазерной гравировкой или фотохимическим травлением. Лазерное гравирование предпочтительнее, поскольку им обеспечиваются более ровные края перфораций. Травлением такие края не получаются.

Для равномерного натяжения трафареты имеют технологическое поле сложной конфигурации, имеющей много резов при изготовлении.

В некоторых из них выполняют более сложные вырезы, чтобы выровнять натяжение. При изготовлении металлического трафарета на лазерном станке большое количество резов значительно его удорожает. В то время как групповое травление перфораций трафарета при фотохимическом фрезеровании не зависит от его конфигурации и потому намного дешевле.

Чтобы уменьшить затраты на лазерное гравирование технологического поля возможно вклеивание металлического трафарета в металлическое сито, натянутого в раме. Тогда демпфирование рабочей части трафарета осуществляется его обрамлением упругой металлической тканью.

Установка и базирование групповой заготовки на рабочий стол станка производится по реперным знакам с помощью автоматического привода с использованием оптической системы распознавания.

После установки и базирования заготовки на столе включается вакуумный прижим, способный выправить коробление платы.

Цикл печати на твердые подложки, как правило, укладывается в 10...30 с.

Сложности возникают при необходимости монтажа на гибкие подложки. В этом случае приходится создавать технологическую оснастку, позволяющую зафиксировать гибкое основание на жесткой подложке. Пока это касается технологии ступелирования кристаллов (Stacked Chip) для России этот процесс не актуален. Но если монтаж компонентов осуществляется на гибкие платы или гибкую часть гибко-жестких плат, технологическая оснастка сопровождает изделие по всему циклу изготовления.

Наиболее важной фазой переноса пасты на подложку является продвижение пасты вдоль поверхности трафарета, так как наносимая масса должна перемещаться по поверхности трафарета с определенной силой прижатия ракеля и строго выверенной скоростью его перемещения. Трафарет и ракель должны быть чистыми, и паста должна иметь строго определенные характеристики для этой силы и скорости. Ошибки в этих параметрах приводят к таким бракам, как закоротки или непропаи. Практика показывает, что больше половины ошибок всего процесса сборки печатных плат приходится именно на процесс нанесения припойной пасты. Преимуществом метода трафаретного нанесения припойной пасты является то, что паста может быть нанесена с очень высокой точностью. В общем случае отверстия трафарета открывают лишь 50...90% площади контактных площадок, что исключает нанесение излишнего количества припойной пасты. Соответственно данный метод, в отличие от диспенсорного нанесения, позволяет осуществлять высокоточный монтаж компонентов со сверхмалым шагом выводов.

Для нанесения припойной пасты используются специальные установки. Такие установки на рынке паяльного оборудования делятся на два типа: лабораторные ручные рамы и полуавтоматические или автоматические принтеры.

В ручных или полуавтоматических установках припойная паста вручную размещается на трафарете и затем прожимается сквозь него на контактные площадки платы с помощью ракеля.

Автоматические установки работают без вмешательства оператора, тем самым существенно уменьшая возможность ошибки. Поскольку время нанесения пасты трафаретной печатью гораздо меньше времени установки компонентов на плату, современные установки (например, фирма Samsung) имеют встроенные системы 2D контроля качества, что позволяет осуществить контроль непосредственно во время нанесения. Таким образом, отпадает необходимость дополнительного промежуточного контроля.

Расположение платы на рабочем поле установки трафаретной печати целесообразно осуществлять диагонально. Только в этом случае обеспечивается равномерное нанесение пасты на контактные площадки 4-х сторонней ориентации (например, для компонентов типа QFP). К тому же нужно отметить, что крепление платы осуществляется только по периферии, и в случаях, когда используются большие мультиплицированные заготовки,

обеспечить достаточную жесткость системы «Плата-Трафарет» можно только за счет дополнительных опор. Встраиваемые в автоматические линии принтеры позволяют в автоматическом режиме в зависимости от размеров платы и расположения компонентов установить дополнительные опоры в рабочей области из внешнего магазина.

Еще одной особенностью при трафаретной печати является вибрационное движение ракеля. Возвратно-поступательные колебания, обеспечиваемые приводом перемещения ракеля, позволяют исключить (или значительно снизить) вероятность проявления эффекта частичного заполнения апертур трафарета. Кроме того, вибрационное движение ускоряет процесс нанесения пасты.

Износостойкость и твердость ракеля сильно влияют на качество нанесения припойной пасты. В условиях массового производства состояние кромки ракеля подлежит тщательному контролю, чтобы кромка ракеля была острой и прямой.

Сила прижатия ракеля к трафарету также влияет на качество оттиска. Слабое прижатие может привести к пропускам либо к неровному заполнению апертур трафарета припойной пастой. Чрезмерное прижатие приводит к вычерпыванию пасты из больших апертур трафарета. Кроме того, может произойти вдавливание пасты между поверхностью трафарета и печатной платой. Проявление такого дефекта зависит от шероховатости мест среза материала из окон трафарета (в случае механического изготовления трафарета).

На сегодняшний день используют два основных типа ракелей: полиуретановые и металлические. По мере уменьшения шага выводов компонентов все большую популярность стали приобретать металлические ракели. Их изготавливают из нержавеющей стали или латуни в форме клина с углом от 30 до 45°.

Благодаря отсутствию смены формы рабочей кромки во время нанесения пасты (благодаря высокой жесткости), металлические ракели не вызывают вычерпывания пасты из окон трафарета. Однако стоимость металлических ракелей гораздо выше полиуретановых, кроме того, они вызывают значительный износ трафарета.

Поскольку для различных компонентов требуется различное количество припойной пасты на контактных площадках платы, существует проблема подбора толщины трафарета. Для нанесения различного объема пасты на контактные площадки одной и той же платы поступают по-разному. Крупные фирмы-производители используют трафареты сложной конфигурации – многоуровневые разнотолщинные трафареты (рис. 9.3). Другие производители используют трафареты двойной толщины (система трафарет на трафарете).

При использовании таких трафаретов паста наносится только каучуковыми (полиуретановыми) ракелями, кромка которых повторяет рельеф

трафарета при нанесении. Важными параметрами металлического трафарета являются точность изготовления апертур и гладкость его поверхностей.

На сегодняшний день существуют три основных способа создания трафаретов: химическое травление, лазерное вырезание, аддитивный способ.

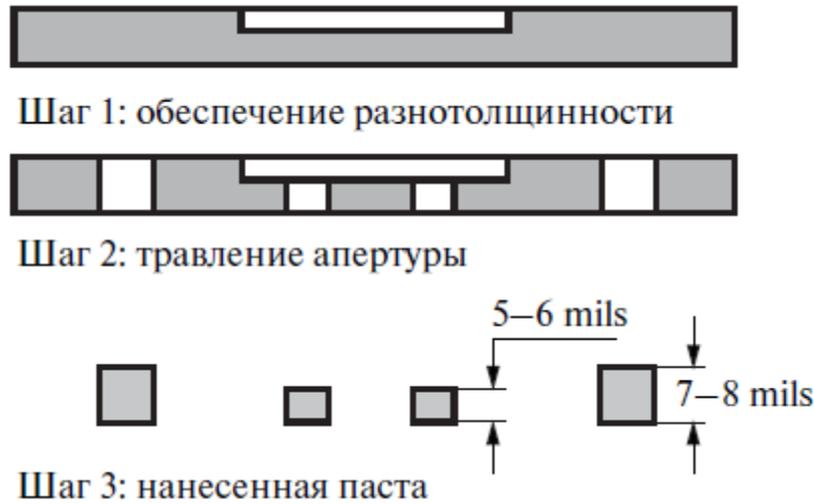


Рис. 9.3. Многоуровневый трафарет

Химическое травление трафаретов. Химическое травление трафаретов по существу является фотохимическим фрезерованием. На металлическую пластину наносят фоторезист с обеих сторон, экспонируют и проявляют, затем травят металл сквозь образовавшиеся окна.

Поскольку при травлении наружные кромки металла подвергаются травлению в большей степени, чем рельеф фоторезист, форма отверстия при одностороннем травлении приближалась бы в сечении к трапеции. Поэтому используют технику двустороннего травления, при которой погрешность формы кромки окна существенно уменьшается.

Физическая природа процесса травления такова, что после травления кромка отверстия не получается гладкой. Существует ряд методов достижения требуемого качества кромки окна: метод электрополировки или гальваническое осаждение никеля.

Полировка всей поверхности трафарета может привести к тому, что шарики припоя в припойной пасте будут «отскакивать» от поверхности трафарета и образовывать пустую прослойку между поверхностью трафарета и кромкой ракеля.

Поэтому стремятся полировать только кромки апертур. Нанесение никеля повышает качество нанесения пасты, однако слой никеля может существенно изменить размер апертур трафарета, что должно учитываться при его проектировании.

Лазерное фрезерование трафаретов. При лазерном изготовлении трафарета нет промежуточного создания фотошаблонов и последующих этапов литографии, поэтому точность размеров апертур гораздо выше, чем при химическом травлении.

Другим преимуществом лазерной резки является то, что стенки апертур можно сформировать в конической форме. Аналогичную форму апертур можно получить и химическим односторонним травлением, однако в этом случае угол будет почти неконтролируемым.

Для существенного облегчения нанесения припойной пасты достаточно клин боковых стенок апертур в 2° . Способ лазерной резки позволяет вырезать апертуры шириной 0,1 мм с точностью 0,01 мм, что делает этот способ перспективным для формирования апертур для компонентов с малым шагом.

Недостатком лазерного изготовления трафаретов является неровность кромок апертур трафарета. Это явление возникает из-за испарения металла и окаливания металла в процессе резки. Это может вызвать закупоривание отверстий трафарета припойной пастой. Сглаживание кромок можно осуществить микротравлением.

Еще одним недостатком такого метода является то, что лазерной резкой невозможно получить многоуровневые трафареты без предварительного химического травления областей, которые должны быть тоньше основного материала трафарета.

Поскольку каждая апертура трафарета вырезается отдельно, стоимость изготовления трафарета таким способом зависит от сложности топологии печатной платы и обычно значительно выше, чем травление.

Аддитивный способ изготовления трафаретов (метод гальванопластики). Третий способ изготовления трафаретов заключается в гальваническом осаждении никеля на гибкую подложку – медную фольгу.

На фольгу накатывается фоторезист, экспонируется и проявляется таким образом, чтобы проявленный рельеф повторял рисунок будущего трафарета (в месте расположения апертур трафарета фоторезист остается, в остальных удаляется при проявлении). Толщина используемой фольги 35 мкм. Затем на полученную подложку осуществляется химико-гальваническое осаждение никеля. После достижения требуемой толщины трафарета процесс осаждения заканчивается и производится смывка фоторезиста. Ключевым этапом получения готового трафарета является отделение никелевого слоя от медной подложки. Этот процесс осуществляется изгибом меди, при котором никель начинает отслаиваться.

Процесс гальванического осаждения, как и метод лазерного вырезания, исключает подтравливание стенок апертур, что исключает забивку пасты под его поверхность. Следовательно, уменьшается вероятность образования замыканий на печатных платах. Такая абсолютно вертикальная

форма кромок апертур приводит к проблемам при снятии трафарета с платы, на которую нанесена припойная паста.

Брак нанесения пасты. Основными видами брака при ручной трафаретной печати, вызванными ошибками оператора, являются:

- неравномерное нанесение пасты (вызвано неравномерной силой прижатия ракеля к трафарету);
- смазывание пасты при отрыве трафарета от печатной платы;
- неполное заполнение апертур трафарета из-за загрязнения кромки ракеля пастой или использования просроченной пасты.

При автоматической трафаретной печати брак чаще всего также возникает из-за погрешностей настройки оборудования:

- неверный подбор зазора между ракелем и трафаретом;
- неправильно подобранная скорость движения ракеля и т.д.

При трафаретном нанесении припойной пасты можно выделить шесть основных видов дефектов:

1. Дефект совмещения трафарета и монтажной платы. Ошибка совмещения апертур трафарета и контактных площадок платы не должна превышать 15% от минимального размера апертуры трафарета для контактной площадки минимального элемента платы.

2. Просадка пасты. Этот дефект может быть вызван неправильно подобранной вязкостью припойной пасты. Рекомендуемая просадка пасты не должна превышать 15% минимального размера контактной площадки.

3. Неравномерность толщины нанесенной пасты. После нанесения пасты её толщина должна колебаться в диапазоне $\pm 20\%$ от желаемой. Слишком тонкий слой материала может быть недостаточным для пайки компонента. Слишком толстый слой может привести к замыканиям контактных площадок платы.

4. Вычерпывание пасты из апертур трафарета. Такой дефект может быть вызван чрезмерной силой прижатия ракеля к поверхности трафарета, слишком мягкой кромкой ракеля. В результате уменьшается количество пасты на контактных площадках. Уменьшение пасты при вычерпывании не должно превышать 20% от расчетной высоты пасты.

5. Излишки пасты. Такой дефект может быть вызван недостаточной силой прижатия ракеля к поверхности трафарета или погрешностью геометрической формы кромки ракеля. Высота нанесенной припойной пасты с учетом этого дефекта не должна превышать расчетную более чем на 20%.

6. Наклон нанесенной пасты по отношению к монтажной плате. Величина наклона регламентируется следующим образом: разница максимальной высоты пасты и минимальной высоты не должна быть больше 20% желаемой высоты.

9.2. Установка компонентов

Это ключевая операция, определяющая производительность линии, разнообразие корпусов компонентов, точность установки, гибкость перестройки под очередной заказ.

9.2.1. Прототипное производство

Полуавтоматические системы установки принципиально отличаются от автоматов отсутствием привода установочной головки – перемещение осуществляет оператор. Автоматизация процесса заключается только в запоминании управляющим устройством координат установки каждого компонента и в блокировке перемещения манипулятора в заданных точках. Такой принцип установки удобен в мелкосерийном производстве и лабораторных условиях. Производительность установки компонентов в этом случае достигает 700 комп/ч.

Но такие малопроизводительные системы не сбалансированы с производительностью производства печатных плат. Можно обозначить примерный баланс этих производительностей: на каждые 1 м²/час производства печатных плат нужна сборочно-монтажная линия с производительностью примерно 20 тыс. компонентов в час.

Существует ряд типоразмеров компонентов, не поддающихся ни ручной, ни полуавтоматической установке. При этом такие компоненты становятся неотъемлемой частью современных электронных модулей.

9.2.2. Принципы установки компоновки

Определились три принципа установки компонентов на основе использования одноголовочного манипулятора, карусельных многоголовочных систем и параллельно работающих нескольких одноголовочных манипуляторов или карусельных систем (параллельные системы).

Одноголовочная позиционирующая система перемещает устанавливаемую головку в ортогональной системе координат с использованием червячного или линейного привода. Она обеспечивает наибольшую гибкость и точность установки широкого ряда компонентов, но не может достичь уровня производительности карусельных и параллельных систем. Зато конструкции таких систем развиваются и совершенствуются, чтобы достичь возможности установки всех существующих компонентов, вплоть до QFP- и BGA-компонентов. С точки зрения точности позиционирования эта система лучшая из трех систем.

Карусельная система с вращающимися установочными головками обеспечивают наибольшую скорость установки компонентов. Для быстрого захвата компонента, кроме вращения карусели с головками, вращаются

и сами головки, чтобы для каждого из устанавливаемых компонентов использовался соответствующий ему захват, закрепленный на головке. Для позиционирования компонента плата перемещается в ортогональной системе с линейными или червячными приводами. Таким образом, приходится одновременно управлять позиционированиями захватов и платы, в то время как карусель, не останавливаясь, вращается с постоянной скоростью, захватывая на проходе движения компоненты и затем устанавливая компоненты на плату. Поскольку карусельная система движется без остановок, она обеспечивает наибольшую из трех систем скорость установки компонентов.

Для массового производства используют параллельные системы. Их принцип состоит в разбиении платы на несколько секций, каждая из которых индивидуально обслуживается отдельной системой. Принцип разбиения на секции может быть произвольным: или по однородности компонентов, или по полю одинаковых плат в групповой заготовке, или по разбиению большой платы на отдельные зоны.

Обычно для установки сложных компонентов используют одnogоловочные системы, их производительность находится в диапазоне от 5 тыс. до 20 тыс. компонентов в час. Высокоскоростные карусельные системы обеспечивают производительность от 20 тыс. до 50 тыс. компонентов в час. Самые быстрые – параллельные системы, работающие со скоростью от 50 тыс. до 100 тыс. компонентов в час.

9.2.3. Управление точностью установки

Второй присутствующей в автоматах сборки функцией является видеосистема, управляющая точностью позиционирования. Именно с ее помощью точно устанавливается местоположение платы и позиционируется компонент на плате. Видеосистемы классифицируются по местоположению камер (снизу или сверху) и расположению источника освещения. Сверху расположенные камеры (*downward-looking cameras* – вниз глядящие камеры) различают маркировки на плате и используют их для коррекции позиционирования компонентов.

Их обычно располагают на головке захвата и установки компонентов. Снизу распознающие камеры используются для инспекции компонентов во время их переноса от места захвата в питателе до установки на плату. Обычно нижняя камера устанавливается стационарно, а траектория перемещения компонента предусматривает его пролет над этой видеокamerой. Время распознавания увеличивается по мере увеличения размеров и сложности компонентов. Для компенсации увеличивающегося времени распознавания питателя со сложными компонентами разносят на две стороны машины и устанавливают по две камеры с каждой стороны на пути их пролета. Точность установки компонентов с использованием видеоси-

стем достигает 0,05...0,1 мм. Эта точность достаточна даже для установки BGA-компонентов.

Видеокамерные системы распознают изображение, анализируя его растр (развертку изображения). Лазерные системы позиционирования в отличие от видео используют растровую развертку луча и точечный детектор. Компонент (его очертания) распознается как тень, образующаяся при прерывании лазерного луча, а само изображение компонента отсутствует. По этой тени компонент позиционируют на плате. Лазерные системы высокопроизводительны, но отсутствие видеоизображения делает их низкоинтеллектуальными. По крайней мере, они не способны правильно сориентировать полярные компоненты и сложные корпуса с периферийными или матричными (BGA) выводами.

9.2.4. Питатели

Питатели используют разнообразные упаковщики компонентов – фидеры: ленты, пеналы, тубы, матричные кассы, вибробункеры и другие, в том числе заказные виды упаковок. Одноголовочные системы способны адаптироваться к любым конструкциям питателей. В противоположность этому, высокоскоростные параллельные системы, особенно карусельные, могут обеспечить свою производительность только с питателей из лент и вибробункеров. Для них устанавливают специальные приспособления, помогающие быстрому выдвиганию компонентов в позицию, с которой их забирает пролетающий захват. Такое ограничение сказывается на выборе компонентов для конструирования плат массового спроса. Или побуждает вести сборку на линиях с разными типами сборочных систем. Так обычно собирают платы мобильных телефонов и материнские платы компьютеров, содержащих большое количество пассивных компонентов, сложные многовыводные микросхемы и компоненты с выводами, монтируемыми в отверстия.

Примечательны технологические решения, позволяющие отказаться от пайки волной припоя. Для этого специальная паяльная паста при трафаретной печати продавливается в отверстия. Реологические свойства этой пасты таковы, что она при установке выводов компонентов в отверстия не выдавливается, а обволакивает вывод, и при последующем нагреве в печи, расплавляясь, образует качественную галтель припоя с заполнением отверстия. Однако не все компоненты со штыревыми выводами могут выдерживать нагрев в печи оплавления. К таким относятся электролитические конденсаторы, разъемы, некоторые типы интегральных схем. Поэтому полный отказ от пайки волной припоя пока не предвидится.

Рынок электронных модулей не уменьшил, а даже увеличил объем продаж конструкций с пайкой выводов в отверстия. Фирмы, специализирующиеся на поставках оборудования для «дырочного» монтажа, успешно

развиваются, предлагая новые модификации. Наиболее успешно в этой области продвигается фирма Royonic, предлагая широкий ряд оборудования для установки «дырочных» компонентов. В том числе универсальные установки для формовки и подрезки выводов. Наиболее знамениты серии полуавтоматов с лазерными целеуказателями. Среди новинок фирмы – портативный цеховой склад с высокоскоростной системой поиска и выгрузки ленточных кассет с компонентами. На стеллаже умещаются 550 кассет с возможностью найти и получить что нужно в течение 5 секунд.

9.2.5. Источники ошибок

Около 80% ошибок на этапе установки компонентов возникают при вводе новых данных в режиме on-line. Однако современные установщики могут быть интегрированы в сеть. В случае возникновения сбойной ситуации можно переслать проблемные файлы в службу технической поддержки. Это позволяет исключить время для выезда сервисного инженера компании-производителя. Кроме того, автоматы Samsung в автоматическом режиме выполняют корректировку сбойных программ управления, исключая простой оборудования из-за незначительных ошибок, в то время как другие установки требуют полной регенерации процесса.

9.2.6. Обновление оборудования

При оснащении производства новым оборудованием важно знать, какое оборудование может понадобится в будущем. Поскольку обычно такой информации нет в момент подбора оборудования, необходимо выбрать такое решение, которое позволило бы в дальнейшем без значительных затрат перестроить весь технологический процесс, так чтобы при этом часть уже купленного оборудования не стала бы бесполезной. Такие решения могут предложить ряд компаний: модульные машины с дополнительными аксессуарами, встраиваемые в автоматические линии, и универсальное ПО с технологией plug-and-play.

Например, для дооснащения линии дополнительными установщиками важно, чтобы уже купленные питатели подходили к новому автомату и ПО линии было совместимо с системой управления нового модуля. Другими словами, приобретение новых машин сохранит первоначальные инвестиции. Можно начать оснащение производства с одного автоматического установщика и затем приобретать новые, устанавливая их параллельно или последовательно и тем самым увеличивать производительность и номенклатуру компонентов. Такая гибкость ПО позволяет, раздвинув линию и установив новый модуль, сразу начать работу без какой-либо механической переналадки оборудования.

9.2.7. Выбор установщиков

Современные электронные модули содержат наряду с большими корпусами микросборок такие миниатюрные компоненты как, CSP, QFP, μ BGA и т.д. Кроме того, необходимо устанавливать и такие чип-компоненты, как 0201, что невозможно без смены инструмента. Обычно в сборочных линиях используют последовательную комбинацию автоматических установщиков: один устанавливает чип-компоненты, другой fine pitch. Количество тех или иных автоматов в технологической цепочке зависит от требуемой производительности. В условиях развития отечественной промышленности наиболее целесообразно оснащать автоматические участки встраиваемыми в автоматические линии универсальными установщиками.

9.3. Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается диспенсорный метод нанесения припойной пасты?
2. Опишите последовательность действий при использовании метода трафаретной печати.
3. В чем заключается химическое травление трафаретов?
4. В чем заключается лазерное фрезерование трафаретов?
5. В чем заключается аддитивный способ изготовления трафаретов (метод гальванопластики)?
6. Какие основные виды дефектов при трафаретном нанесении припойной пасты вы знаете?
7. Какие принципы установки компонентов вы знаете?

10. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев А. М. Сборка и монтаж электронных устройств. Москва: Техносфера, 2007. – 256 с.
2. Медведев А. М. Печатные платы. Конструкции и материалы. Москва: Техносфера, 2005.
3. Медведев А. М. Технология производства печатных плат. Москва: Техносфера, 2005.
4. Нинг-Ченг-Ли. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP Flip-Chip технологии. Москва: Издательский Дом «Технологии», 2006.
5. Коледов Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: учебник для вузов. Москва: Радио и связь, 1989.
6. Майк Джюд, Кейт Бриндли. Пайка при сборке электронных модулей. Москва: Издательский Дом «Технологии», 2006.
7. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат: учебник. Москва: Форум: Инфра-М, 2005.

11. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

11.1. Общие положения

Целью самостоятельной работы по дисциплине «Монтаж и наладка электронных устройств» является систематическое изучение дисциплины в течение семестра, закрепление и углубление полученных знаний и навыков, подготовка к предстоящим занятиям, формирование культуры умственного труда и самостоятельности в поиске и приобретении новых знаний и умений для углубления профессиональных компетенций. Самостоятельная работа обучающегося заключается в выполнении домашних заданий в форме конспектирования, составления обзоров.

11.2. Содержание самостоятельной работы

Содержание теоретического материала дисциплины для самостоятельного изучения представлено в табл. 11.1.

Табл. 11.1. Самостоятельная работа обучающегося

№ недели	Вид самостоятельной работы
7-й семестр	
1-3	Самостоятельное изучение литературных источников перед лекционными занятиями
4-5	Подготовка к лабораторной работе №1
6-7	Подготовка к практической работе №1
8-9	Подготовка к лабораторной работе №2
10-11	Подготовка к практической работе №2
12-13	Подготовка к лабораторной работе №3
13-14	Подготовка к практической работе №3
15-16	Подготовка к экзамену
8-й семестр	
1-3	Самостоятельное изучение литературных источников перед лекционными занятиями
4-5	Подготовка к лабораторной работе №4
6-7	Подготовка к лабораторной работе №5
8-9	Подготовка к лабораторной работе №6
10	Подготовка к экзамену

Дополнительно к рекомендованному по дисциплине учебно-методическому и информационному обеспечению обучающийся может использовать для самостоятельной подготовки и другие учебные и научные книги, научные статьи, Internet ресурсы и др.