

электроники

А. МЕДВЕДЕВ

Сборка
и монтаж
электронных
устройств



ТЕХНОСФЕРА



МИР электроники

А. МЕДВЕДЕВ

Сборка и монтаж электронных устройств

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2007

Медведев А.М.

Сборка и монтаж электронных устройств

Москва:

Техносфера, 2007. — 256 с.

ISBN 978-5-94836-131-4

Производство электронной аппаратуры неуклонно наращивается, увеличивается плотность компоновки и миниатюризация аппаратуры, развиваются технологии поверхностного монтажа. И несмотря на это уже более десяти лет в России отсутствуют свежие специализированные издания, посвященные современным проблемам сборки и монтажа. Существует лишь разрозненная информация в периодической печати и на сайтах фирм, поставляющих соответствующее оборудование. Но и эта информация не всем доступна.

Предлагаемая книга написана по материалам зарубежной периодической печати, международных конференций и, что особенно ценно, по результатам опыта работы таких высокотехнологичных предприятий отрасли, как LVS, Fastwel, МЭЛЗ, Альтоника и др.

Книга посвящена описанию процессов, материалов и оборудования, используемых в сборочно-монтажном производстве, и предназначена для начинающих специалистов в этой области технологий, преподавателей и студентов технических вузов по специальности «Конструирование и технология производства электронной аппаратуры».

© 2007, А. М. Медведев

© 2007, ЗАО «РИЦ «Техносфера»
оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-131-4

Содержание

Введение.....	15
----------------------	-----------

Глава 1.

Электронные компоненты.....	17
1.1. Тенденции – постоянная интеграция.....	17
Конструкции корпусов микросхем	22
1.3. Непосредственный монтаж кристаллов на подложку	26
1.4. Микрокорпуса (CSP).....	29
1.5. Дискретные компоненты	32
1.6. Сопоставительная оценка компонентов	34
1.7. Покрытия компонентов под пайку.....	35
1.8. Материалы корпусов компонентов	37
1.9. Упаковка компонентов.....	38
1.10. Печатные платы.....	39
1.10.1. Требования к печатным платам.....	39
1.10.2. Материалы монтажных оснований.....	41
1.10.3. Металлизация отверстий	42
1.10.4. Покрытия под пайку.....	42
1.11. Заказчик и производитель.....	44
1.11.1. P-CAD или GERBER?	45
1.11.2. Рекомендации по конструированию печатных плат применительно к автоматизированной сборке	46
1.11.3. Оформление конструкторской документации	50
1.12. Заключение.....	51
Литература.....	52

Глава 2.

Физико-химические основы монтажной пайки.....	53
2.1. Классификация способов нагрева	53
2.2. Процессы на границе раздела	53
2.2.1. Первая стадия – адсорбция	53
2.2.2. Вторая стадия – адгезия	55
2.2.3. Третья стадия – смачивание	55
2.2.4. Четвертая стадия – поверхностные реакции	56
2.2.5. Пятая стадия – сцепление	57
2.2.6. Стадии физико-химического процесса пайки	57
2.3. Процессы нагрева при пайке	58
2.3.1. Общие вопросы монтажной пайки	58
2.3.2. Пайка волной припоя.....	60
2.3.2.1. Технологические этапы процесса волновой пайки	60
2.3.2.2. Блок флюсования	61

2.3.2.3.	Предварительный нагрев	61
2.3.2.4.	Процесс пайки	61
2.3.2.5.	Охлаждение	62
2.3.2.6.	Особенности пайки волной припоя	62
2.3.3.	Инфракрасная пайка	63
2.3.4.	Конвекционный нагрев	67
2.3.5.	Конденсационная пайка	69
2.3.6.	Локальная пайка	71
2.3.6.1.	Пайка паяльниками	71
2.3.6.2.	Пайка горячим газом	72
2.3.6.3.	Пайка сопротивлением	74
2.3.6.4.	Лучевая пайка	75
2.3.6.5.	Лазерная пайка	76
2.4.	Выбор методов нагрева для монтажной пайки	78
2.5.	Типичные дефекты пайки	78
2.5.1.	«Холодные» пайки	78
2.5.2.	Растворение покрытий	81
2.5.3.	Отсутствие смачивания	81
2.5.4.	Растворение покрытий	84
2.5.5.	Интерметаллические соединения	85
2.5.6.	Эффект «надгробного камня»	86
2.5.7.	Сдвиг компонента	89
2.5.8.	Отток припоя	90
2.5.9.	Образование перемычек	92
2.5.10.	Отсутствие электрического контакта	93
2.5.10.1.	Эффект подушки	93
2.5.10.2.	Другие виды отсутствия электрического контакта	93
2.5.10.3.	Отслаивание галтели	94
2.5.11.	Образование шариков припоя	94
2.5.12.	Образование пустот	96
2.6.	Заключение	97
	Литература	98

Глава 3.

Материалы для монтажной пайки	99
3.1. Низкотемпературные припои	99
3.1.1. Диаграмма сплавов олово-свинец	100
3.1.2. Примеры других мягких припоев	102
3.1.3. Загрязнения припоев	102
3.1.4. Составы припоев	104
3.2. Припои для бессвинцовой пайки	107
3.2.1. Существо бессвинцовой пайки	107

3.2.2.	Бессвинцовые припой	107
3.2.3.	Финишные покрытия для бессвинцовой пайки	110
3.2.4.	Проблемы бессвинцовой пайки.....	110
3.3.	Флюсы для монтажной пайки.....	111
3.3.1.	Назначение флюсов	111
3.3.2.	Составы флюсов.....	111
3.3.2.1.	Классификация флюсов.....	111
3.3.2.2.	Флюсы на синтетической основе.....	114
3.3.3.	Типы флюсов.....	115
3.3.4.	Активаторы	116
3.3.5.	Растворители во флюсах и пастах	117
3.3.6.	Реологические добавки.....	117
3.3.7.	Остатки флюсов	117
3.3.8.	Применение флюсов	119
3.3.9.	Проверка правильности выбора припоя, флюса, температуры и времени пайки.....	119
3.4.	Паяльные пасты.....	120
3.4.1.	Требования к паяльным пастам.....	120
3.4.2.	Составы паяльных паст	121
3.4.3.	Гранулированный припой в паяльных пастах	125
3.4.4.	Флюсы в паяльных пастах	128
3.4.5.	Остатки флюсов	129
3.4.6.	Заключение	130
3.5.	Клеи.....	130
3.5.1.	Механизмы полимеризации клеев.....	130
3.5.2.	Назначение клеев в сборочно-монтажных процессах	132
3.5.3.	Прочность клеевого соединения.....	133
3.5.4.	Влагоустойчивость клеев	134
3.5.5.	Требования к поверхностному сопротивлению	134
3.5.6.	Клеевые композиции.....	135
3.5.6.1.	Связующие	135
3.5.6.2.	Наполнители.....	136
3.5.6.3.	Пластификаторы	136
3.5.6.4.	Тиксотропные добавки	136
3.5.6.5.	Стабилизаторы.....	136
3.5.6.6.	Красители	137
3.5.6.7.	Прочие добавки	137
3.6.	Растворители.....	137
3.6.1.	Жидкости для отмывок от загрязнений плат.....	137
3.6.2.	Вода как растворитель	138
3.6.3.	Органические растворители	139
3.6.4.	Смеси растворителей.....	140

3.6.5. Пожаро- и взрывоопасность органических растворителей	141
3.6.6. Антипирены	142
3.7. Заключение	142
Литература	143

Глава 4.

Монтажная микросварка	144
4.1. История сварки.....	144
4.2. Место микросварки в производстве электроники	145
4.3. Механизм образования сварного шва	146
4.4. Термокомпрессионная микросварка	147
4.5. Ультразвуковая сварка	152
4.6. Микросварка расщепленным электродом	153
4.7. Точечная электродуговая сварка	154
4.8. Сварка микропламенем.....	155
4.9. Лучевая микросварка.....	156
Литература	158

Глава 5.

Непаяные методы неразъемных соединений.....	159
5.1. Принципы непаяных соединений	159
5.2. Монтаж соединений накруткой.....	160
5.2.1. Контактное соединение накруткой	160
5.2.2. Конструкции соединений накруткой	163
5.2.3. Закрепление и прочность соединительных штырей	165
5.2.4. Технология накрутки	165
5.2.5. Современное применение накрутки.....	167
5.3. Соединение скручиванием и намоткой.....	168
5.4. Винтовое соединение	168
5.5. Зажимное соединение сжатием («термипойнт»).....	169
5.5.1. Соединительный штырь	169
5.5.2. Провод.....	169
5.5.3. Зажим — клипса	170
5.6. Соединение с помощью спиральной пружины.....	170
5.7. Клеммное соединение прижатием.....	170
5.8. Соединения обжатием.....	171
5.9. Эластичное соединение («зебра»)	172
5.10. Соединения врезанием.....	173
5.11. Соединение проводящими пастами	174
5.12. Соединения типа Press-Fit	178
5.12.1. Обусловленность появления и применения Press-Fit	178
5.12.2. Элементы Press-Fit.....	181

5.12.2.1. Контактные штыри.....	181
5.12.2.2. Сквозные металлизированные отверстия.....	182
5.12.2.3. Механизм образования соединения	184
5.12.3. Техника межсоединений на основе технологий Press-Fit	187
5.12.4. Прочность соединений Press-Fit.....	188
5.12.5. Проблемы технологии запрессовки	189
5.13. Заключение	189
Литература	192

Глава 6.

Технология сборки и монтажа электронных модулей	193
6.1. Поверхностно монтируемые изделия (SMD-компоненты).....	194
6.1.1. Чип-резисторы.....	194
6.1.2. Резисторы MELF	195
6.1.3. Чип-конденсаторы	195
6.1.4. Чип-индукторы	196
6.1.5. Дискретные полупроводниковые компоненты	196
6.1.6. Интегральные схемы	196
6.2. Разнообразие типов компоновок.....	198
6.2.1. Классификация типов сборок.....	198
6.2.1.1. Тип 1. Установка компонентов с одной стороны	198
6.2.1.2. Тип 2. Установка компонентов с двух сторон	199
6.2.3. Маршруты сборки и монтажа.....	200
6.2.3.1. Последовательность сборки типа 1А	201
6.2.3.2. Последовательность сборки типа 1В	201
6.2.3.3. Последовательность сборки типа 1С	201
6.2.3.4. Последовательность сборки типа 2А	201
6.2.3.5. Последовательность сборки типа 2В	202
6.2.3.6. Последовательность сборки типа 2С	203
6.2.3.6. Последовательность сборки типа 2D.....	203
6.3. Технологии пайки при поверхностном монтаже.....	203
6.3.1. Пайка волной	203
6.3.2. Пайка оплавлением	204
6.3.3. Преимущества технологии с использованием паяльной пасты при поверхностном монтаже.....	205
6.4. Последовательность сборки и монтажа.....	206
6.4.1. Схема процесса.....	206
6.4.2. CAD-CAM – системы	209
6.4.3. Хранение и подготовка компонентов	209
6.4.4. Нанесение паяльной пасты на контактные площадки плат ...	211
6.4.4.1. Диспенсорный метод нанесения припойной пасты ..	211
6.4.4.2. Трафаретный метод нанесения припойной пасты	213

6.4.4.3. Трафаретный метод нанесения припойной пасты	221
6.4.5. Нанесение клеев (адгезивов).....	222
6.4.6. Установка компонентов.....	225
6.4.6.1. Прототипное производство.....	225
6.4.6.2. Принципы установки компоновки.....	225
6.4.6.3. Управление точностью установки.....	226
6.4.6.4. Питатели	227
6.4.6.5. Источники ошибок.....	228
6.4.6.6. Обновление оборудования	228
6.4.6.7. Выбор установщиков.....	229
6.5. Пайка	229
6.5.1. Термопрофиль	229
6.5.2. Методы нагрева.....	232
6.5.3. Требования, предъявляемые к печам пайки оплавлением.....	233
6.6. Очистка	234
6.7. Материалы лаковых покрытий	239
6.8. Тестирование	241
6.9. Инженерное обеспечение производства	242
6.9.1. Одежда персонала.....	242
6.9.2. Очистка воздуха	243
6.9.3. Термостабилизация.....	245
6.9.4. Управление влажностью.....	245
6.9.5. Вытяжная вентиляция	245
6.9.6. Уровень шума и вибрации	246
6.9.7. Магнитные и электромагнитные поля.....	246
6.9.8. Электростатический заряд в воздухе и на поверхности	246
6.10. Сертификация сборочно-монтажного производства по ИСО 9000...	247
6.10.1. Общие положения	247
6.10.2. Входной контроль материалов и комплектующих	248
6.10.3. Технологическая документация	248
6.10.4. Контрольные операции	249
6.10.5. Метрологическое обеспечение.....	249
6.10.6. Идентификация продукта	250
6.10.7. Система качества	250
6.10.8. Аттестация технологического оборудования и оснастки.....	251
6.10.9. Аттестация персонала	251
6.10.10. Анализ дефектов и отказов.....	251
6.10.11. Контроль функционирования системы качества.....	252
6.10.12. Испытания продуктов	252
6.10.13. Процедуры сертификации	253
6.11. Заключение.....	255
Литература.....	255

ВВЕДЕНИЕ

Электроника, информационные технологии, средства коммуникаций стали технической базой высоких технологий. Ядром этих технологий являются технические и программные средства обработки информации и вычислений. Вооруженность этими средствами, полнота их использования определяет облик современного общества.

Со времен создания первых средств информационной и вычислительной техники (электронных, магнитных, релейных, пневматических, химических, оптических) главная тенденция развития этой техники состоит в стремлении к микроминиатюризации и повышению функциональности ее компонентов. Эта тенденция проявилась в изобретении транзисторов с последующей их интеграцией в микросхемы. Успехи технологии полупроводниковых микросхем создали для микроэлектроники приоритет над другими принципами обработки информации и вычислений. Только в средствах коммуникации электроника уступает волоконно-оптической технике. Но в обработке информации электронный принцип довлеет над другими.

Постоянное совершенствование микроэлектронной технологии, рост степени интеграции микросхем, увеличение функциональной насыщенности электронной аппаратуры, повышение производительности вычислительных процессов требуют постоянного роста плотности печатного монтажа, освоения новых технологий сборочно-монтажного производства, улучшения мер технологического обеспечения надежности. Современные требования к электронным приборам и оборудованию заставляют эти процессы идти со все возрастающей скоростью.

Кардинально изменился подход к созданию электронной аппаратуры, которая должна одновременно обеспечивать высокое быстродействие, расширенный динамический диапазон, относительно малое энергопотребление, высокую чувствительность, повышенную стойкость к воздействию внешних факторов.

Постоянно увеличивается сложность конструкций средств информационной и вычислительной техники. При этом все больше усложняются технологии их реализации. Совершенствование известных технологий сопровождается привлечением новых, без которых сегодня невозможно изготовить сложный электронный узел. Растущие конструктивно-технологические требования к электронной аппаратуре особенно четко установились именно в области информационной и вычислительной техники, поскольку увеличение производительности процессов обработки информации и вычислений находится в непосредственной зависимости от плотности межсоединений, так как время переключения элементов интегральных схем стало соизмеримым с временами задержки сигналов в линиях связи. Можно сказать, что

основная тенденция развития технологий производства информационной и вычислительной техники — увеличение плотности межсоединений вслед за увеличением интеграции и миниатюризации электронных компонентов.

В отечественной и зарубежной практике ведется непрерывный поиск новых и совершенствование известных методов межсоединений. Ежемесячно публикуются сотни патентов, описывающих новые процессы и операции, претендующих на новое слово в технологиях электронной аппаратуры. Среди достижений в технологии монтажа появлялись и методы, изобретение которых сопровождалось значительной рекламой, но на практике они оказались маловыгодными или ненадежными либо нашли ограниченное применение. Ежегодные международные конференции, симпозиумы по международной стандартизации, практика производства, дискуссии специалистов способствуют отбору выверенных решений, на основе которых родились базовые технологии. Именно для базовых общепринятых технологий разрабатываются стандарты, оборудование и материалы. На их основе строятся новые производства с многомиллионными вложениями капитала.

Конечно, как сказал один мудрец: «Если бы человечество придерживалось мнения большинства, Земля до сих пор плавала бы на трех китах». Но технология традиционно наиболее консервативная отрасль техники, она не терпит революций и развивается эволюционно. Промышленное освоение новых технологических принципов обходится слишком дорого, чтобы перестраивать под них производство без предварительного опробования в технологических лабораториях.

Сегодня, в условиях рыночной экономики, особенно важно проявлять профессионализм в инвестировании производства, поскольку каждая даже, казалось бы, малозначительная ошибка может привести к большим экономическим потерям. В этом принципиальное отличие нашего времени от предыдущего периода затратной экономики, мало считавшейся с потерями ради дальней цели.

Производство средств информационной и вычислительной техники относится к высоким технологиям, требующим от специалистов высокой степени профессионализма. Безусловно, эта книга может служить лишь введением в технологию электроники. Жизнь показывает, что успеха достигает лишь те специалисты-технологи, которые постоянно пополняют свою информационную базу, смело и обдуманно идут на эксперимент и в практике производства приобретают столь ценный опыт, позволяющий им уверенно чувствовать себя в управлении производством.

Тема сборочно-монтажного производства непосредственно связана с технологиями печатных плат. Им посвящены соответствующие издания [1–5] и многочисленные публикации в популярных журналах [6–10].

ГЛАВА I

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ

1.1. Тенденции – постоянная интеграция

Развитие микрoeлектронных компонентов постоянно идет в направлении увеличения интеграции, производительности и функциональности. Этот процесс характеризуется увеличением плотности активных элементов на кристалле примерно на 75% в год, а это, в свою очередь, вызывает необходимость в увеличении количества их выводов на корпусе на 40% в год. Казалось бы, с увеличением интеграции микросхем количество внешних межсоединений и, соответственно, выводов должно было бы уменьшаться. Однако выведенное давным-давно инженером фирмы IBM правило Рента [1] до сих пор оказывается справедливым для развивающейся элементной базы:

$$n = kN^R,$$

где n – количество выводов микросхемы, k – среднее число межсоединений, приходящихся на один логический элемент микросхемы ($k = 3...4$), N – количество логических элементов, R – соотношение Рента (например, для процессоров $R = 0,5...0,74$).

Поэтому растет спрос на новые методы корпусирования (конструкции выводов), а вслед за этим – на увеличение плотности межсоединений на печатной плате. Этот спрос обусловлен стремлением уменьшить дезинтеграцию активных компонентов при переходе на очередной иерархический уровень межсоединений в аппаратуре: кристалл микросхемы, корпус микросхемы, монтажное поле для размещения выводов и соединений на печатной плате, печатный узел (электронный модуль), электронный блок, системный блок... На уровне печатного узла степень дезинтеграции можно было бы характеризовать соотношением площадей кристалла (S_1), корпуса (S_2) и монтажного поля на плате (S_3):

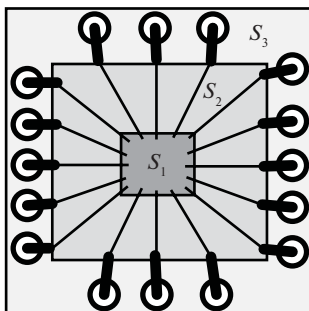


Рис. 1.1. Площади кристалла (S_1), корпуса (S_2) и монтажного поля на плате (S_3)

$Q_1 = S_3 / S_1$, когда выводы микросхемы находятся за внешним периметром корпуса,

$Q_2 = S_2 / S_1$, когда выводы и монтажное поле целиком находятся под корпусом (рис. 1.1).

Например, если кристалл процессора имеет размер 10×10 мм, а монтажное поле его корпуса на плате занимает площадь 4000 мм, такое конструктивное исполнение системы межсоединений характеризуется дезинтеграцией с числом 40. Этой цифрой оценивается матрица из 800 выводов. Периферийное расположение такого количества выводов с шагом 0,4 мм занимает монтажное поле площадью 10 000 мм, значит, степень дезинтеграции такого конструктивного исполнения — 100.

Нужно заметить, что степень дезинтеграции растет по мере возрастания иерархического уровня конструкции: кристалл — микросхема — печатный узел — модуль — блок — ... Например, дезинтеграция в блоке может достигать цифры 100 тыс.

В табл. 1.1 приведены данные грубой оценки дезинтеграции при использовании различных методов корпусирования и установки кристаллов микросхем процессора на монтажное основание (плату).

Таблица 1.1. Оценка дезинтеграции при переходе на следующий уровень межсоединений

Вариант монтажа или установки	Площадь монтажного поля на подложке, мм	Степень дезинтеграции
Кристалл	10×10	1
Flip-Chip	$12,5 \times 12,5$	1,5
Wire-Bond	14×14	2
Flip-TAB	24×24	6
TAB	42×42	18
Flat-Pack	72×72	52
Корпус с периферийными выводами	105×105	110

Очевидно, что степени интеграции и дезинтеграции должны соответствовать техническому уровню развития производства. При стремлении выполнить конструкцию на предельных возможностях производства стоимость изделия станет неоправданно высокой из-за большого объема отходов на брак. Надежность таких конструкций также не будет гарантирована. Если же в производство поступит изделие, спроектированное по низким проектным нормам, т.е. с большой степенью дезинтеграции (больших габаритов), его большая материалоемкость, низкая фондоотдача («из пушки по воробьям») также пагубно скажется на его себестоимости.

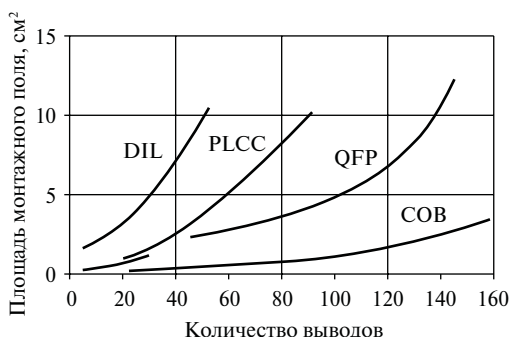


Рис. 1.2. Размер монтажного поля для размещения выводов корпусов различных конструкций

Но эти соотношения справедливы только для микросхем с одинаковым уровнем интеграции. А поскольку процессы увеличения плотности активных компонентов микросхем и увеличение плотности монтажного поля корпусов микросхем идут параллельно, более справедливо демонстрировать процессы увеличения плотности монтажа количеством выводов, размещаемых на определенной площади монтажного поля печатной платы, как показано на рис. 1.2.

В результате общих тенденций площадь монтажных подложек уменьшается примерно на 7%, а физические размеры электронной аппаратуры – на 10–20% в год. Эта тенденция поддерживается непрерывным увеличением плотности межсоединений за счет уменьшения монтажных поверхностей вместе с увеличением количества выводов, и вслед за этим уменьшаются элементы присоединения, шаг и конструкции выводов компонентов.

Таблица 1.2. Численные характеристики МПП (см. рис. 1.27)

Символ	Наименование параметра	Минимальный размер, мм		
		Сегодня	Завтра	Послезавтра
Характеристики рисунка				
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

Таблица 1.2. Окончание.

Символ	Наименование параметра	Минимальный размер, мм		
		Сегодня	Завтра	Послезавтра
Характеристики глухих отверстий				
Е	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

В конце 80-х гг. прошлого столетия в производстве электроники началась своеобразная революция — переход на технологии поверхностного монтажа. Тогда казалось, что она полностью вытеснит монтаж выводов в отверстия. Но, как выяснилось, это не всегда возможно: крупные элементы (конденсаторы большой емкости, разъемы, трансформаторы и др.) удобнее монтировать выводами в отверстия. Поэтому развитие технологий идет не столько за счет вытеснения компонентов с выводами для пайки в отверстия, сколько за счет увеличения доли компонентов поверхностного монтажа.

До последнего времени подавляющее большинство конструкций корпусов микросхем использовало периферийную систему выводов. Развитие технологий корпусирования и монтажа таких компонентов дошло до своего предела: плотность расположения периферийных выводов достигла шага 0,4 мм (в редких случаях — 0,3 мм). Поэтому в 90-е гг. началась очередная революция в технике монтажа — переход к матрице выводов. Чтобы еще и в матричных корпусах увеличить плотность монтажа, шаг сетки выводов постоянно уменьшается: недавно он был 1,0 мм, потом он стал 0,8 мм, теперь назревает шаг 0,5 мм.

За этим следует уменьшение элементов печатного монтажа: ширины проводников и зазоров, отверстий и контактных площадок, пространственного (послойного) распределения межслойных переходов за счет использования сквозных, глухих, слепых отверстий. Все это серьезно влияет на

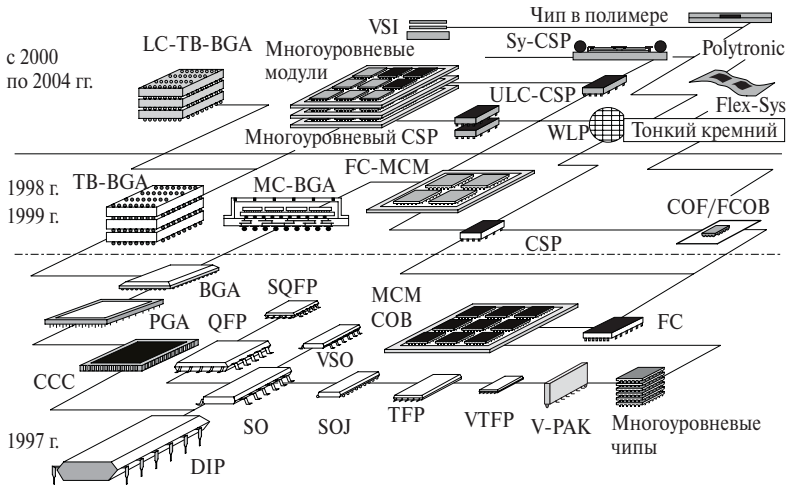


Рис. 1.3. Эволюция корпусов микросхем

облик сборочно-монтажного производства: оно все в большей мере становится автоматическим, вручную многие компоненты невозможно ни установить, ни припаять. Поэтому увеличивается стоимость основных фондов сборочно-монтажного производства, но уменьшается объем прямых затрат, приходящихся на единственный логический элемент микросхем, сокращается цикл производства. В свою очередь, печатные платы, как монтажные подложки для SMT-компонентов, становятся сложнее и дороже, но за счет увеличения функциональности электронных изделий стоимость выполняемых ими функций становится в конечном итоге меньше.

Зримо идет сращивание кристаллов микросхем с монтажной подложкой без промежуточного монтажа кристалла в корпус, которое вскоре должно завершиться созданием технологии многокристалльных модулей. По существу ее реализация возможна уже сегодня. Но тут вступают в силу проблемы теплоотвода: чем выше плотность размещения кристаллов на подложке, тем выше удельная плотность тепловыделений — следствия неизбежного рассеивания мощности. Без эффективного теплоотвода многокристалльный модуль попросту перегреется и сгорит. Совмещение электрических и тепловых структур в одной монтажной подложке — назревшая задача современного конструирования электронной аппаратуры.

Рис. 1.3 достаточно наглядно демонстрирует эволюцию и разнообразие корпусов и монтажных подложек, чтобы понять, что сегодня не сформировались еще устойчивые, всех удовлетворяющие решения, из которых можно было бы выбрать ограниченный ряд конструкций, чтобы можно было ограничить разнообразие технологий для их реализации.

1.2. Конструкции корпусов микросхем

С самого начала кристаллы микросхем помещали внутрь керамических или пластмассовых корпусов. Примерно до 1986 г. все корпуса микросхем имели выводы, предназначенные для монтажа в металлизированные отверстия

Обозначение	Примеры
CC Chip Carrier	    PQCC PQCC (PLCC) PQCC (CLCC) PQCC (CLCC)
CY Cylinder	   MBCY MBCY PBCY
DB Disk Button	    PADB LRDB GRDB PRDB
FP Flatpack	   CQFP CDFP PQFP
PF Press Fit	 MUPF
PM Post/Stud mount	   MUPM MUPM CRPM
SO Small Outline	   PDSO PDSO PSSO
SS Special Shape	 PDBS

Рис. 1.4. Обозначение конструкций корпусов микросхем

(PTH — Plated Through-hole — металлизированное отверстие) печатной платы и последующей пайки. Позднее, с увеличением интеграции, их выводы стали делать в форме, пригодной для технологии поверхностного монтажа (SMT — Surface Mounting Technology), ставшей преобладающей технологией монтажа электронных компонентов.

На промежуточном этапе развития технологий монтажа получили распространение корпуса микросхем, пригодные как для монтажа в отверстие, так и для поверхностного монтажа.

Основными типами корпусов микросхем в зависимости от расположения их выводов (рис. 1.4) являются:

- корпуса с периферийным расположением выводов, когда выводы расположены по краям кристалла или корпуса микросхемы;
- корпуса с матричным расположением выводов.

Большинство типов микросхем имеют периферийное расположение выводов. Шаг периферийных выводов ограничен 0,3 мм (практически — 0,4...0,5 мм), что позволяет микросхемам с корпусами больших размеров иметь до 500 выводов. Но нужно принять во внимание, что при шаге выводов меньше 0,5 мм выход годных изделий резко снижается, уменьшается прочность контактных узлов, увеличивается вероятность появления перемычек припоя между выводами, травмирования изоляционных зазоров. Разнообразие форм выводов показано на рис. 1.5.

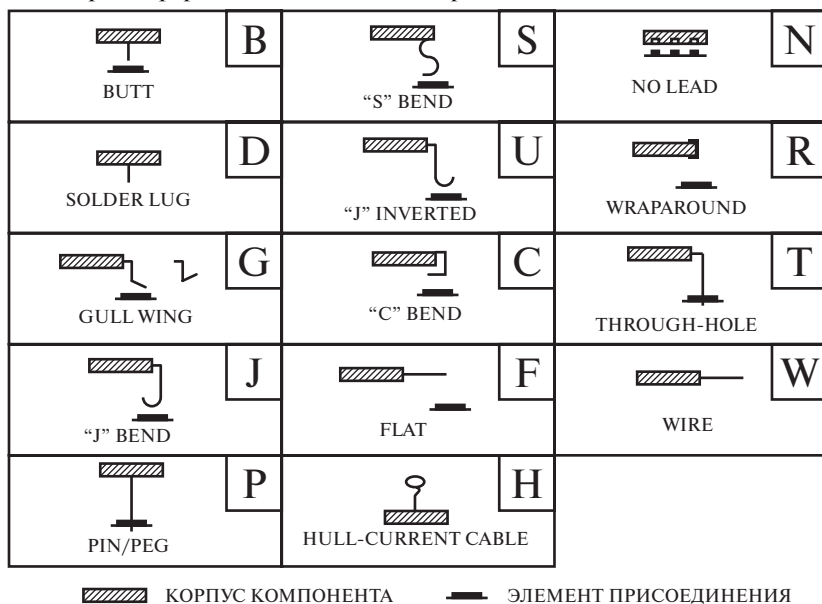


Рис. 1.5. Обозначение выводов микросхем

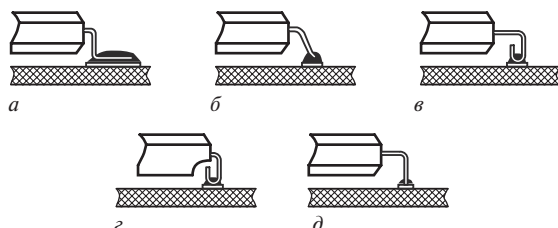


Рис. 1.6. Формы выводов: *а* – «Крыло альбатроса»; *б* – *L*-образный; *в* – *J*-образный открытый; *г* – *J*-образный скрытый; *д* – *J*-образный (пайка встык)

Наибольшее распространение получили плоские *L*-образные выводы типа «крыла чайки», «крыла альбатроса», *I*-образные и *J*-образные выводы, которые за счет изгиба компенсируют тепловые и механические деформации (рис. 1.6).

Корпус с *J*-образными выводами (рис. 1.7) занимает на ПП меньше места, устойчив при транспортировке, хорошо согласуется с различными упаковками, корпуса не застревают в механизмах подачи автоматов установки микросхем на ПП. Основной недостаток этих выводов – сложность визуального контроля паяного соединения.

В варианте формовки с *J*-образными скрытыми выводами предусмотрена возможность переноса места пайки под корпус микросхемы, благодаря чему возможна компоновка с предельно малыми зазорами между смежными корпусами. Кроме того, корпуса с такой формой выводов способны вставать в разъемные колодки, контакты которых обжимают *J*-образные выводы корпуса.

Корпуса с *L*-образными выводами (рис. 1.6, *б*) лучше контролируются и при их контроле легко применять стандартные зонды. При автоматическом монтаже ИМС с расположением выводов с четырех сторон возникают трудности, так как корпуса застревают в транспортных трактах и возникают деформации выводов. Основным отличием варианта формовки с *L*-образными выводами («крыло чайки») от обычного «крыла альбатроса» является значительное сокращение длины припаиваемого вывода (до размера, равного или близкого ширине самого вывода).

Микросхемы в корпусах типа DIP (с *I*-образными выводами) разрабатывались исключительно для монтажа в отверстия, но в связи с внедрением технологии поверхностного монтажа эти микросхемы приспособливают и к монтажу на поверхность. Микросхемы с такой формовкой выводов могут быть смонтированы так же, как микросхемы в корпусах с планарными

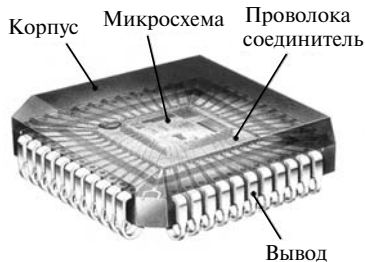


Рис. 1.7. Структура корпуса с *J*-выводами

выводами. Кроме того, микросхемы в DIP-корпусах могут монтироваться на поверхность пайкой встык.

Вероятнее всего, в перспективе монтаж элементов на печатные платы будет ориентироваться на пайку выводов под корпусом элементов по технологии поверхностного монтажа, а шаг выводов будет сокращаться. В связи с этим большой интерес у проектировщиков электронной аппаратуры вызывают корпуса микросхем с матричным расположением выводов типа BGA (Ball Grid Array).

Компоненты с матричным расположением выводов очень разнообразны (рис. 1.8):

- CSP (Chip-scale Packages — корпус, соизмеримый с размером кристалла),
- PBGA (Plastic Ball Grid Array — пластмассовые корпуса с шариковыми матричными выводами),
- CBGA (Ceramic Ball Grid Array — керамические корпуса с шариковыми матричными выводами),
- PPGA (Plastic Pin Grid Array — пластмассовые корпуса с матричными контактными площадками),
- CCGA (Ceramic Column Grid Array — керамические корпуса со столбиковыми матричными выводами).

Матричное расположение контактов обеспечивает наибольшую плотность монтажа, максимальное количество контактов на площадь корпуса (до 700 контактов на корпусе размером 35×35мм). Минимальные переходные емкости контактов у них лучше по сравнению с другими монтируемыми на поверхность корпусами, что обеспечивает работоспособность при более высоких тактовых частотах внешних информационных магистралей. Для теплопередачи между корпусом и печатной платой на нижней поверхности корпуса по его центру выделяется специальная теплоотводящая площадка.

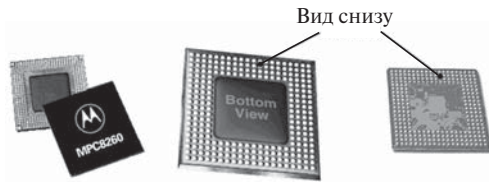


Рис. 1.8. BGA-корпуса

Предполагается, что микросхемы с количеством выводов от 150 до 200 будут выполняться в корпусах с периферийным расположением выводов. Для микросхем с количеством выводов более 150...200 предпочтительнее матричная система выводов, так как она делает возможным размещение большого количества межсоединений на ограниченной площади.

Конструкции плавких выводов в матричной системе:

- столбиковые выводы из припоя, армированного «путанкой» из тонкого провода, для корпусов микросхем и многокристалльных модулей MCM (Multichip Module), часто называемых также «матрица контактных площадок» (pad grid), «матрица выводов» (land grid),

- матрица шариковых выводов (BGA — ball grid array) с шагом выводов 1,50 мм (0,060 дюйма), 1,27 мм (0,050 дюйма), 1 мм (0,040 дюйма), 0,8 мм (0,03 дюйма) и менее.

Матричная система выводов обеспечивает ряд очевидных преимуществ.

Наиболее важными являются:

- минимальная площадь монтажного поля подложки,
- лучшие условия обеспечения функциональной производительности электронных модулей за счет меньших паразитных эффектов на быстродействующих операциях,
- упрощение технологии поверхностного монтажа на печатную плату,
- больший выход готовой продукции вопреки опасениям потери качества из-за невозможности прямого визуального контроля соединений.

Для непаяных методов присоединения, например при использовании разъёмных соединений, выводы корпуса выполняют в виде матрицы контактных штырей, сопрягаемых с матрицей гнезд (рис. 1.9). На свободной от контактных штырей поверхности располагают активные и пассивные дискретные компоненты в соответствии со схемотехническими требованиями. Теплоотвод осуществляется от верхней поверхности корпуса с использованием радиатора и вентилятора или, если это кондуктивный теплоотвод, — от специальных теплоотводящих элементов, соединяемых с теплоотводящими конструкциями монтажной подложки через теплопроводную склеивающую прокладку.

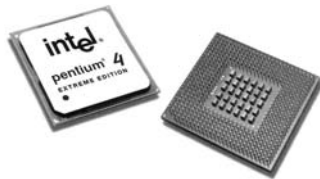


Рис. 1.9. Корпус с матрицей контактов, вставляемых в гнезда разъемов. центральной области корпуса — конденсаторы развязки

С уменьшением шага выводов особенно важно, чтобы разработчики печатных плат считались с необходимостью обеспечения технологичности их конструкций, правильно с этих позиций оценивали не только сборочные, но и производственные характеристики печатных плат, чтобы разработанные конструкции гарантировали наибольший выход и наименьшую себестоимость готовой продукции.

1.3. Непосредственный монтаж кристаллов на подложку

Потребности в уменьшении массы и габаритов конструкций электронной аппаратуры обусловили интерес к методам непосредственного монтажа кристаллов микросхем на плату DCA (Direct Chip Attach): «Кристалл на плате» — COB (Chip-on-Board), «Кристалл на стекле» — COG (Chip-on-Glass), «Кристалл на полимере» — COF (Chip-On-Flex) и, если их много на подложке, «Многокристалльные модули» — MCM (Multi-Chip-Module).



Рис. 1.10. Монтаж кристалла микросхемы непосредственно на плате. Технология «Кристалл на плате» (COB)

Технология «Кристалл на плате» предусматривает расположение микросхем непосредственно на монтажной поверхности печатной платы. Кристалл микросхемы приклеивается к плате и соединяется к ней тонкими проводочками, как правило, золотыми диаметром порядка 25 мкм. Затем вся конструкция заливается защитным компаундом (рис. 1.10).

Преимуществами COB являются:

- низкая стоимость;
- разнообразие вариантов разводки платы;
- короткий период производства;
- широкий температурный диапазон и высокая механическая прочность конструкции.

Но сравнительно большие габариты модуля с COB в сборе не позволяют использовать наработки традиционных технологий монтажа кристалла на подложку, в частности, возникают трудности с позиционированием кристалла на плате и совмещением рабочих элементов инструмента с площадками присоединения проводочков на кристалле. Поэтому для размещения кристаллов на монтажной подложке начинают использовать технологии печатных плат (рис. 1.11).

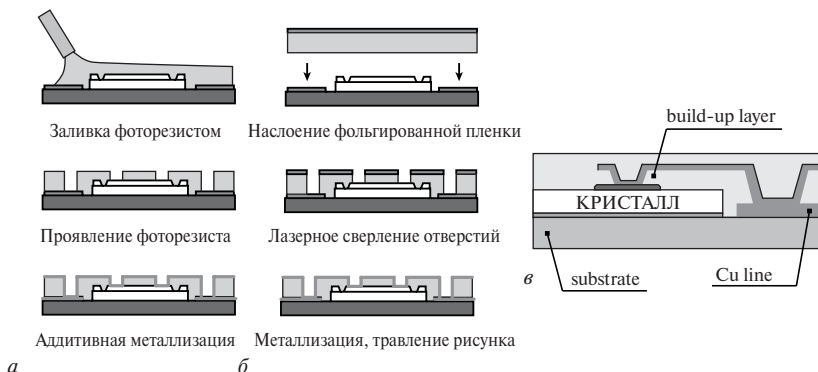


Рис. 1.11. Присоединение контактных точек кристалла микросхемы к монтажной подложке приемами технологий печатных плат: *а* — аддитивным методом, *б* — субтрактивным методом, *в* — конструкция межсоединений между кристаллом и печатной платой

Кристалл на полимере представляет собой способ компоновки, при котором кристалл микросхемы, пассивные и активные компоненты располагаются на тонкой полиимидной пленке. Такая технология обеспечивает очень малую толщину и массу готового изделия, что важно при использовании такой сборки в компактных устройствах (например, в сотовых телефонах). Основные недостатки — сравнительно высокая стоимость и низкая механическая прочность.

Конструкция «Кристалл на стекле» преимущественно используется в технологиях дисплеев, когда управляющую микросхему, пассивные компоненты, схему температурной компенсации и ПЗУ знакогенератора располагают непосредственно на подложке дисплея, что позволяет уменьшить габариты и стоимость модуля. Дисплеи, изготовленные по технологии COG, широко применяются в портативных приборах. Недостатком такой компоновки являются необходимость дополнительных элементов конструкций для защиты от электромагнитных помех и инфракрасного излучения.

Кристаллы микросхем монтируют на подложку одним из четырех методов:

1. Термокомпрессионная микросварка (wire-bonding) — наиболее старый, гибкий и широко применяемый метод (рис. 1.12). Этим методом до сих пор изготавливают более 96% всех микросхем.

2. Присоединение кристаллов к выводам ленточного носителя (рис. 1.13) или TAB (Tape-automated Bonding). Этот метод используется для автоматического монтажа кристаллов с малым шагом выводов на промежуточный носитель. Кроме возможности автоматизации монтажа он обеспечивает возможность предварительного тестирования кристаллов перед окончательной установкой его на монтажную подложку.

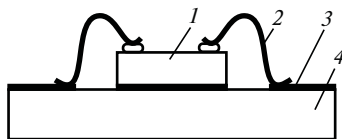


Рис. 1.12. Разводка кристалла методом компрессионной микросварки: 1 — кристалл микросхемы, 2 — микропровода, 3 — контактная площадка монтажной подложки, 4 — подложка

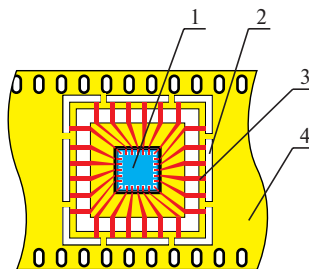


Рис. 1.13. Ленточный носитель кристалла микросхемы: 1 — кристалл микросхемы, 2 — кадр ленточного носителя, 3 — контактные площадки для монтажа носителя на монтажной подложке, 4 — транспортная лента для автоматизации установки кристалла на монтажную подложку

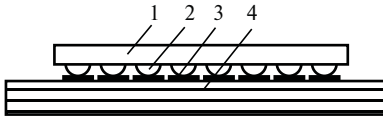


Рис. 1.14. Монтаж микросхемы на подложку методом перевернутого кристалла: 1 — кристалл микросхемы, 2 — шариковый вывод, 3 — контактная площадка монтажной подложки, 4 — монтажная подложка (печатная плата)



Рис. 1.15. Монтаж микросхемы с помощью балочных выводов: 1 — кристалл микросхемы, 2 — балочный вывод, 3 — контактная площадка монтажной подложки 4 — монтажная подложка (печатная плата)

3. Присоединение перевернутого кристалла (Flip-chipping)* через шариковые выводы (рис. 1.14). Компактность и улучшенные электрические характеристики этого метода межсоединений способствуют его расширяющемуся применению.

4. Присоединение кристалла балочными выводами (рис. 1.15). В этом методе используют технологии термокомпрессионной и ультразвуковой микросварки балочных выводов к периферийным контактным площадкам на кристалле и затем — балочных выводов к монтажным площадкам на кристалле и затем — балочных выводов к монтажной подложке.

При оценке возможности использования этих методов необходимо принимать во внимание разные температурные коэффициенты расширения кристаллов из кремния и монтажной подложки. Кроме прямого решения этой проблемы выбором соответствующего материала подложки она может быть эффективно решена заливкой эпоксидной смолой, разделяющей кристалл и плату. Подобный прием позволяет выровнять деформации кристалла и подложки и за счет этого существенно улучшить надежность таких сборок.

1.4. Микрокорпуса (CSP)

При непосредственной установке кристаллов на монтажные подложки не всегда есть возможность предварительно убедиться в их правильной работе до монтажа на подложку. К настоящему времени существует несколько технологий для решения этой проблемы. В зарубежной терминологии эта проблема имеет название «заведомо исправный кристалл» (KGD — Known Good Die). Один из путей ее решения — использование микрокорпусов, раз-

* На пластину кремния («вафлю») со сформированными на ней микросхемами методами прецизионной трафаретной печати наносится паяльная паста на монтажные точки кристалла. После оплавления паста превращается в шарики, которые служат монтажными выводами, как у компонентов типа BGA, только с гораздо меньшим шагом. На конечной стадии «вафля» разрезается на отдельные микросхемы (чипы). Далее эти «flip-chipping» устанавливаются на монтажную подложку, шарики выводов оплавляются, образуя паяное соединение с монтажным полем подложки. Эти «flip-chipping» используют в системе «Кристалл-на-плате» (Chip-on-Board).

меры которых лишь ненамного превышают размеры кристалла, но выполняют функции защиты от внешней среды и перераспределяют выводы кристалла на матрицу выводов микрокорпуса (рис. 1.16). Применение микрокорпусов позволяет тестировать микросхему до установки ее на монтажную подложку. На микросхемах с программируемой логикой (ПЛИС) создается возможность программировать их пережиганием перемычек в соответствии с задуманной схемой. Типовой пример микрокорпусов – CSP-корпус (CSP — Chip-scale Packaging).

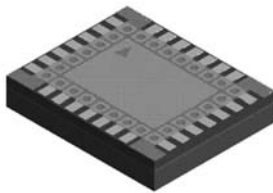


Рис. 1.16. Микрокорпус CSP

Кремниевый кристалл стал ближе к печатной плате. Поскольку для некоторых CSP-корпусов шаг матричных выводов составляет 0,5 мм (0,020 дюйма) и менее, требуется использование специальных технологий производства печатных плат, позволяющих обеспечить разводку сигнальных цепей в узких пространствах между элементами монтажного поля. Уменьшение размеров элементов межсоединений приводит к значительным концентрациям механических напряжений, вызванных разницей в их коэффициентах теплового расширения. Из-за этого повысились требования к паяным соединениям, которые помимо обеспечения электрических соединений призваны поглощать механическую нагрузку. При уменьшении шага выводов до размера менее 0,8 мм происходит значительное уменьшение размера контактной площадки под пайку, что может привести к механической перегрузке и в конце концов к разрушению паяных соединений. Для решения этой проблемы были разработаны новые способы подготовки поверхностей под пайку, которые обеспечили более стойкие паяные соединения.

Существующие технологии производства печатных плат способны обеспечить монтаж выводов бескорпусных микросхем, если он выполняется по технологии термокомпрессионной сварки или с использованием ленточных носителей (ТАВ-технологии). И хотя такое решение переносит трудности защиты открытых кристаллов микросхем на корпусирование электронных модулей, оно все еще остается одним из наиболее эффективных методов монтажа бескорпусных микросхем.

При использовании корпусов с малым шагом матричных выводов ситуация усложняется тем, что сигнальные связи от внутренних выводов матрицы необходимо вывести между контактными площадками матрицы. При этом имеется возможность провести между контактными площадками один, максимум два проводника. Поэтому в большинстве случаев проводники от внутренних выводов матрицы выводятся по внутренним слоям многослойных печатных плат.

Традиционные технологии многослойных печатных плат методом металлизации сквозных отверстий не способны к монтажу микросхем с мат-

ричными выводами с шагом менее 1,0 мм (0,040 дюйма). И в то же время уже созданы корпуса микросхем типа CSP с шагом матричных выводов 0,508 мм (0,020 дюйма) и 0,254 мм (0,010 дюйма). Для монтажа таких компонентов к МПП добавляются специальные слои с глухими металлизированными отверстиями, на которых реализуется разводка цепей из-под микрокорпусов или из-под бескорпусных кристаллов микросхем (рис. 1.11).

Такие тонкие дополнительные специализированные слои напрессовываются на МПП, после чего в них выполняются глухие металлизированные отверстия. Поэтому данный метод за рубежом получил названием (буквально) «напрессованная на поверхность схема» или SLC (Surface Laminar Circuit). Наряду с этим приобретает большее распространение термин built-up (надстройка). И хотя в России для этого метода пока нет установившегося термина, можно видеть, что в нем соединены метод металлизации сквозных отверстий и метод послойного наращивания. Значит, ему можно присвоить длинное название — «МПП с послойным наращиванием внешних слоев» или «МПП с глухими отверстиями», пока в русской среде специалистов не установится более лаконичное название.

При выборе новых решений корпусирования нужно иметь в виду, что корпусирование без промежуточной подложки хотя и вызывает сложности на первых этапах освоения этой технологии, но в конечном итоге оно оказывается наиболее рентабельным. Как видно из рис. 1.17, корпусирование кристалла в микрокорпус имеет высокий шанс стать основой компоновки будущего.

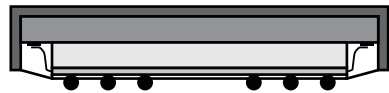


Рис. 1.17. Микрокорпус

В этом случае корпус начинается с диэлектрика, который соединяет полупроводник через микропереходы со сформированным поверх слоем, на котором находятся шарики припоя, позволяющие создать соединения с печатной платой в процессе пайки оплавлением. В этом случае отпадает нужда в промежуточном органическом носителе, так как носителем являет-

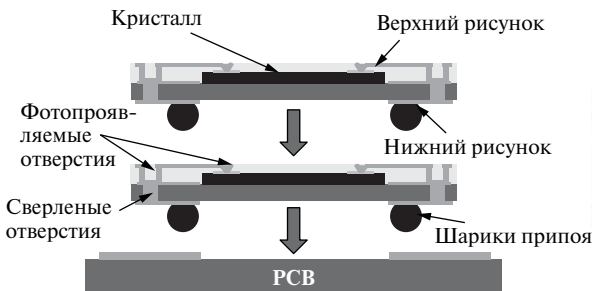


Рис. 1.18. Двухэтажная сборка кристаллов или микрокорпусов

ся сам кремниевый кристалл, а проводные соединения заменены надежной технологией формирования межсоединений со сформированным поверх слоем.

До последнего времени CSP такого типа использовались относительно редко. Причина этого, очевидно, не в стоимости корпусирования, а в недостаточно развитой технологии формирования межсоединений.



Рис. 1.19. Трехэтажное стэпелирование микрочипов

Это означает, что с распространением таких корпусов конструктивные нормы для печатных плат должны быть серьезно пересмотрены и станут использоваться новые типы межсоединения по оси Z. Требования к технологии пайки также предельно ужесточаются, поскольку значительно уменьшается размер каждого паяного соединения на печатной плате.

Дальнейшие перспективы развития технологии корпусирования связаны с разработкой многоуровневой (стековой), или модульной, технологии, которая призвана сократить плотность межсоединений вне корпусов за счет использования концепции перенесения межсоединений внутрь многокристального модуля. Для этого уже используются двухэтажные (рис. 1.18), трехэтажные конструкции на жестких основаниях (рис. 1.19). Гибкие многослойные подложки позволяют уменьшить монтажную площадь многокристальных модулей (рис. 1.20) путем свертывания их в кубическую форму (рис. 1.21).

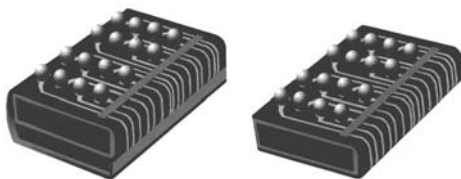


Рис. 1.20. Многокристальный модуль на гибкой основе

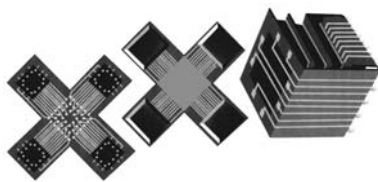


Рис. 1.21. Многокристальный модуль на гибкой основе

1.5. Дискретные компоненты

Элементная база для поверхностного монтажа включает в себя обширную номенклатуру дискретных (рассыпных) элементов самого разного назначения. Наиболее простым и распространенным типом корпусов является прямоугольный или чип (Chip). Практически все конденсаторы и резис-

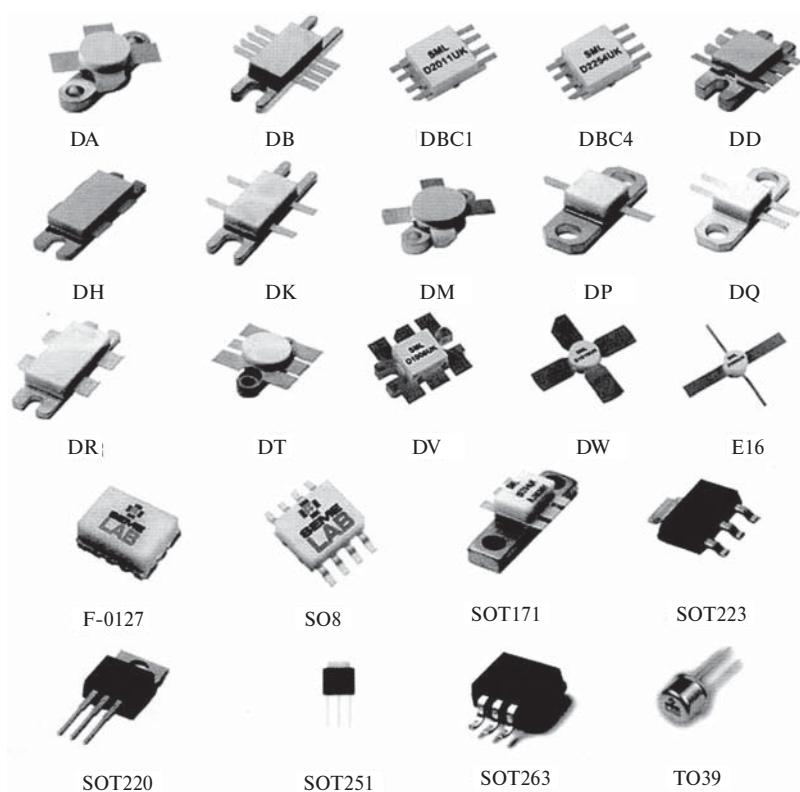


Рис. 1.22. Дискретные чип-компоненты

торы имеют прямоугольную форму корпуса с металлическими контактами по бокам.

Зарубежные производители предлагают широкую номенклатуру чип-элементов (рис. 1.22). Кроме конденсаторов и резисторов имеются индуктивности, электролитические конденсаторы, диоды, стабилитроны, переключатели и другие элементы.

Большая часть чип-компонентов по размерам обозначают в системе mil таким образом, что первые две цифры обозначают длину компонента в долях mil, две последние — ширину:

Обозначение	Размеры, mil	Размеры, мм
0201	0,2×0,1	0,50×0,25
0402	0,4×0,2	1,00×0,50
0603	0,6×0,3	1,50×0,75
0805	0,8×0,5	2,00×1,25
5845	5,8×4,5	14,5×11,2

Другим массовым типом корпуса является цилиндрический или MELF (Metal Electrode Face-bonding) и MiniMELF. Эти корпуса имеют стеклянный корпус и металлические контакты по торцам. В таких корпусах монтируются резисторы и диоды.

Специально для диодов разработан корпус типа SOD (Small Outline Device), представляющий собой стеклянный корпус с металлической крышкой. Для того чтобы отличать катод от анода, помещенного в такие корпуса на стеклянный корпус, ближе к катоду наносят черное кольцо.

Специально для транзисторов разработан корпус типа SOT (Small Outline Transistor). Корпуса этого типа имеют пластмассовый корпус и металлические выводы по бокам.

В корпуса типа SOT помещают не только транзисторы и диоды, но и транзисторы с резисторами, стабилитроны, стабилизаторы напряжения на базе операционного усилителя и многое другое, а количество выводов может быть более трех.

1.6. Сопоставительная оценка компонентов

Общие тенденции к микроминиатюризации связаны с громадными затратами на обновление основных фондов в микроэлектронике, производстве печатных плат и в сборочно-монтажном производстве. Тем не менее эти тенденции проявляют себя в разнообразии приемов увеличения плотности межсоединений в корпусах микросхем, в печатных платах, в сборке и монтаже. На рис. 1.23 показано, какие приемы микроминиатюризации используют различные производители элементной базы, а на рис. 1.24 приведена сопоставительная себестоимость этих приемов.

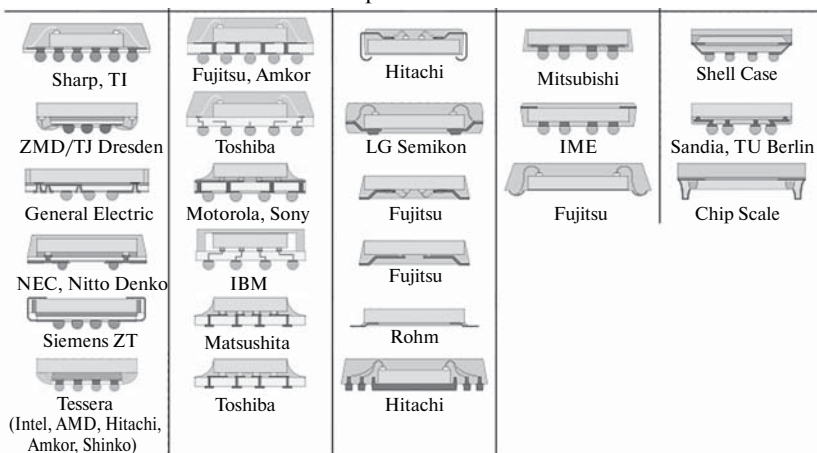


Рис. 1.23. Приемы микроминиатюризации различных фирм

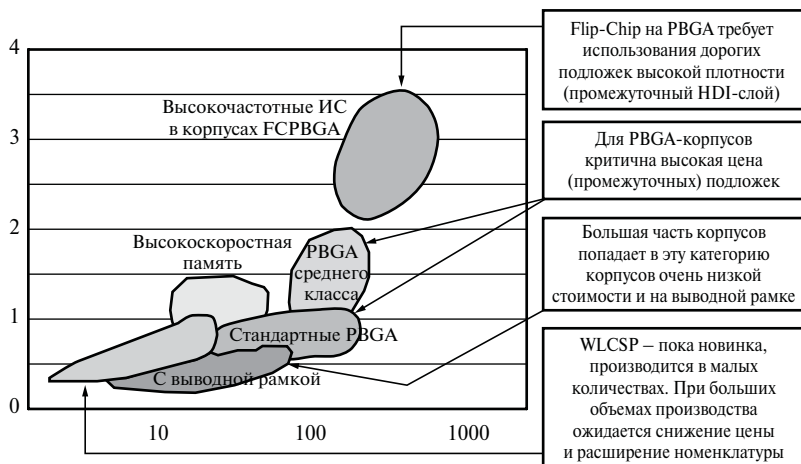


Рис. 1.24. Сопоставление себестоимости методов микроминиатюризации корпусов микросхем

Что касается пассивных компонентов, то они уменьшаются до размеров маковых зерен: от корпусов 0201 уже переходят к 01005. Но более плодотворным считается перенос пассивных компонентов в конструкции печатных плат: за один прием трафаретной печати, например, могут наноситься резисторы, за другой — диэлектрический слой конденсаторов. Однако при необходимости иметь точные значения резисторов или большие емкости конденсаторов неизбежно используются дискретные компоненты.

1.7. Покрyтия компонентов под пайку

Компоненты — наиболее слабое звено в монтажной пайке. Особенно это относится к бессвинцовой пайке. Вся масса компонентов, до сих пор находившаяся в обращении на рынке, была предназначена для пайки SnPb-припоями. С 1 июля 2006 г. вступила в силу директива RoHS, предписывающая использование технологий бессвинцовой пайки [11]. Первые компоненты для бессвинцовой пайки поступили в продажу в 2000 г. Они имели следующие покрытия для пайки: Sn, SnCu и SnBi. Но для бессвинцовой пайки стандарты на покрытия компонентов до сих пор отсутствуют, поэтому фирмы, выпускающие отдельные партии компонентов для бессвинцовой пайки, действуют на свой страх и риск.

Существует несколько типов компонентов, реагирующих на условия пайки по-разному в зависимости от конструкции:

- дискретные компоненты, такие как чип-резисторы;
- SMT-компоненты, такие как PQFP;
- корпуса с шариковыми выводами, такие как BGA-компоненты;

- компоненты с выводами для пайки в отверстия, такие как DIP-компоненты.

Лидирующие на текущий момент покрытия компонентов:

- матовое гальваническое олово для дискретных компонентов;
- матовое гальваническое олово для SMT-компонентов с коротким жизненным циклом (5 лет и менее);
- матовое гальваническое олово с никелевым подслоем для долгоживущих компонентов (более 5 лет);
- Sn4Ag0,5Cu для шариковых выводов BGA для бессвинцовой пайки;
- гальваническое олово или лужение выводов компонентов с выводами для пайки в отверстия.

Покрытие SnPb совершенно не совместимо с бессвинцовой пайкой. Вообще, о совместимости припоев разных систем приходится говорить, когда компоненты имеют SnPb-покрытие, а используются в бессвинцовых процессах. Такое совмещение становится источником дефектов. Это особенно относится к таким компонентам, как BGA и QFP. Некоторые покрытия, например SnPbBi (90 °C), SnBi (138 °C), SnPbAg (179 °C) и SnPb (183 °C), уменьшают температуру плавления. Но они создают риск в управлении процессом бессвинцовой пайки и снижают ее надежность. Риск выхода пайки из-под контроля увеличивается и в случае, когда компоненты имеют бессвинцовые покрытия, а паяются SnPb-припоем. При этом возникает возможность расслоения пайки и разбрызгивания легкоплавкого припоя.

Чистое олово хорошо паяется в широком диапазоне температур. Однако его использование опасно из-за возможности рекристаллизации при температуре ниже 13 °C («оловянная чума») и образования усов. Но после пайки чистое олово перестает быть таковым, и потому эти опасения не оправданны.

SnBi. Эвтектический сплав 42Sn58Bi имеет температуру плавления 138 °C. Аналогичный сплав, но содержащий 3% висмута, плавится при температуре 215...220 °C. Эти сплавы также проявляют способность к образованию усов, и в сочетании с SnPb-припоями после пайки эта опасность не исчезает.

SnAg. Эти сплавы проявляют хорошую паяемость и хорошие механические свойства, однако они дороги. Сплав Sn3,5Ag относительно дешев, но проявляет склонность к образованию усов. Сплав Sn5,0Ag лишен этого недостатка, но он дороже и имеет неприемлемо высокую температуру плавления.

NiPd были освоены фирмой Texas Instruments в 1989 г. За это время фирма продала миллионы компонентов с этим покрытием и не имеет нареканий.

SnCu. Эвтектический сплав Sn0,7Cu — относительно дешевый, мелкозернистый припой, демонстрирующий хорошую паяемость. Но и он проявляет склонность к рекристаллизации олова и образованию усов. Плавится при температуре 227 °C.

1.8. Материалы корпусов компонентов

Высокие температуры пайки приводят к необходимости требовать от компонентов успешного прохождения испытаний на термоудар, который происходит при погружении в припой на 10 с при температуре 260 °С или на 5 с при температуре 280 °С. Корпуса не должны взрываться (эффект «попкорн»), деформироваться, обесцвечиваться или подплавляться. Пластмассы с высокой термостойкостью дороже прежних, используемых для SnPb-пайки и сорбирующих влагу. Объем сорбированной влаги зависит от гигроскопичности материала и конструкции корпуса. Сорбированная влага при резком нагреве быстро превращается в пар. Давление пара вызывает вздутие (эффект «попкорн»), разрывы, трещины. Даже если пластмассы не трещат, они могут расслаиваться внутри корпуса. Диффузия влаги в объеме компаунда пропорциональна температуре и относительной влажности среды. Полное равновесие с внешней средой наступает тем раньше, чем меньше объем корпуса.

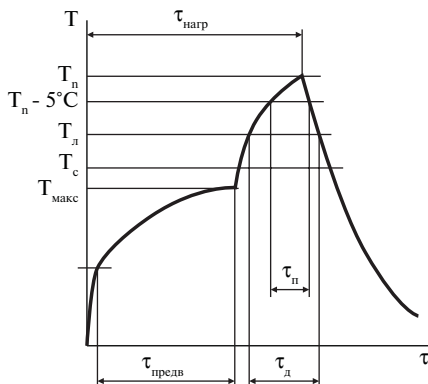


Рис. 1.25. Термопрофиль пайки бессвинцовыми сплавами

Испытания компонентов на термоудар проводят в три стадии:

- предварительный нагрев для полного удаления остаточной влаги из объема корпуса;
- контролируемое увлажнение корпуса в заданных температурно-влажностных условиях;
- термоудар, имитирующий процесс пайки.

Существуют нормативные документы [12], определяющие уровни температуры и влажности, после которых корпуса компонентов должны выдерживать термоудар. В последующем эти уровни соотносятся с разрешенным временем пребывания распакованных компонентов в контролируемой среде цеха до поступления на сборочно-монтажную линию. Это время может составлять от 4 до 24 часов. Если за это время компоненты не поступят на пайку, их нужно хранить в сухих шкафах, где поддерживается относительная влажность 3...5%.

В табл. 1.3 показаны режимы испытаний, имитирующие условия пайки оплавлением эвтектическим сплавом олово-свинец и бессвинцовыми сплавами. На температурном профиле пайки (рис. 1.25) показаны обозначения, использованные в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Испытательные режимы нагрева компонентов, имитирующие условия пайки оплавлением. Сравнение режимов пайки оловом-свинцом и бес-свинцовыми припоями

Условия оплавления	Эвтектический сплав олово-свинец		Бессвинцовые припои	
	Большие корпуса	Малоразмерные корпуса	Большие корпуса	Малоразмерные корпуса
Скорость подъема температуры от температуры ликвидуса $T_{\text{л}}$ до пиковой температуры $T_{\text{п}}$	3 °C/с – максимум		3 °C/с – максимум	
Предварительный нагрев				
$T_{\text{мин}}$	100 °C		150 °C	
$T_{\text{макс}}$	150 °C		200 °C	
Время предварительного нагрева от $T_{\text{мин}}$ до $T_{\text{макс}} - \tau_{\text{Пред}}$	60...120 с		60...180 с	
Скорость нагрева от $T_{\text{макс}}$ до $T_{\text{л}}$	3 °C/с – максимум		3 °C/с – максимум	
Температура ликвидуса $T_{\text{л}}$	183 °C		217 °C	
Время пребывания при $T_{\text{л}} - \tau_{\text{л}}$	60...150 с		60...150 с	
Пиковая температура $T_{\text{п}}$	225 ⁺⁰ ₋₅ °C	240 ⁺⁰ ₋₅ °C	245 ⁺⁰ ₋₅ °C	250 ⁺⁰ ₋₅ °C
Время пребывания при $T_{\text{п}} - 5\text{ °C} - \tau_{\text{п}}$	10...30 с	10...30 с	10...30 с	20...40 с
Скорость охлаждения	6 °C/с – максимум		6 °C/с – максимум	
Время перехода от 25 °C до $T_{\text{п}} - \tau_{\text{Нагр}}$	6 мин		8 мин	

1.9. Упаковка компонентов

При подготовке, установке компонентов и пайке паяльником в условиях единичного производства способ поставки компонентов на рабочие места не имеет особого значения. При автоматизированной и механизированной сборке средства ввода компонентов в работу автоматов существенно сказываются на производительности и устойчивости процесса. Эти средства в виде индивидуальных и групповых носителей компонентов поступают с завода-изготовителя.

К носителям для транспортировки, хранения и подачи компонентов в механизмы технологического оборудования предъявляются следующие основные требования:

- защита компонентов от механических воздействий и статического электричества;
- сохранение ориентации компонентов;
- возможность применения в оборудовании, снабженном соответствующими загрузочными устройствами;
- сравнительная дешевизна при условии одноразового применения;

- возможность возврата на завод-изготовитель при условии многократного применения.

Резисторы и конденсаторы с осевыми выводами поставляются клееными в двухрядную липкую ленту на тканевой основе. Выводы компонентов выполняют удлиненными. Вклейку в ленту производят на специальных автоматах.

В катушке, в которой производится поставка, помещается лента, содержащая тысячи компонентов. Во избежание сцепления соседних витков, склеивания лент и повреждений компонентов или их выводов намотку ведут с межслойной прокладочной лентой. Диаметр катушки 245...400 мм, ширина 70...90 мм.

Компоненты типа DIP (с двухрядным расположением выводов) упаковывают в пеналы с профилем типа П. Компоненты соскальзывают вдоль пенала к месту захвата их головкой автомата.

Для упаковки поверхностно монтируемых компонентов используются ленточные носители с внутренними гнездами. В качестве стандартных приняты носители шириной 8; 12; 16; 24 и 48 мм. Носители изготавливаются из картона или из литой поливинилхлоридной пленки с угольным наполнителем (для антистатической защиты), в которых выштампованы гнезда для компонентов (такие ленты называют «блистерными»). На одну катушку диаметром 175 или 325 мм наматывается до 12 метров ленты вместимостью 2000...5000 компонентов.

Многовыводные компоненты (микросхемы) размещают в специальных корзинах с гнездами или пеналах (для DIP-корпусов, SOIC, SOT), откуда их забирает головка сборочного автомата.

1.10. Печатные платы

Печатные платы, независимо от того, что они относятся к самостоятельному производству монтажных подложек, можно отнести к комплектующим сборочно-монтажного производства, как изделия, поступающие извне. В связи с этим нет необходимости рассматривать технологии изготовления печатных плат. Им посвящены соответствующие издания [1–5] и многочисленные публикации в популярных журналах [6–10].

Здесь имеет смысл рассмотреть вопросы сопрягаемости современных компонентов с печатными платами, выступающими в роли монтажных подложек.

1.10.1. Требования к печатным платам

Что нас должно интересовать в печатных платах применительно к требованиям сборочно-монтажного производства?

1. Плотность монтажного поля. Размер 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 приходится с этим мириться, чтобы получить 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. Что она должна быть читаемой — спору нет. Но 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%. Но с этим приходится считаться, чтобы за счет

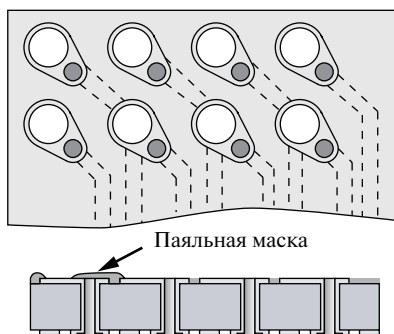


Рис. 1.26. Один из способов предотвращения перетока расплавленного припоя в отверстие

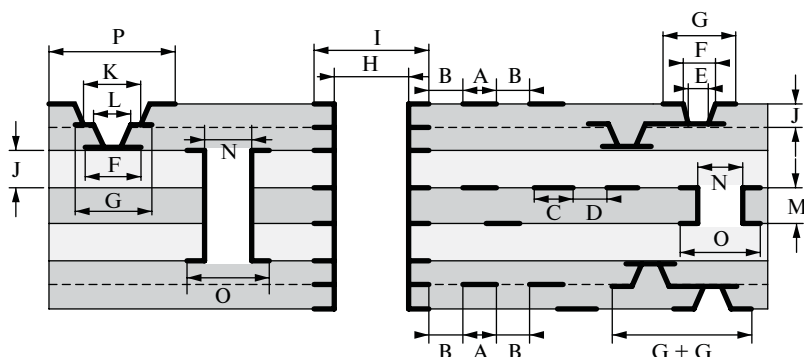


Рис. 1.27. Геометрические характеристики МПП

тестирования обеспечить приемлемый уровень качества и надежности электронного модуля.

10. Наконец, 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 необходимо соблюсти условия пайки без утечки припоя в металлизированные отверстия (рис. 1.26), закрывая их паяльной маской, или заполнением металлом (медью по специальной технологии).

Обозначение геометрических характеристик печатных плат показано на рис. 1.27, а численные характеристики плат сегодня и в перспективе приведены в табл. 1.2.

1.10.2. Материалы монтажных оснований

Чтобы избежать проблем расслоения и коробления оснований печатных плат, их необходимо изготавливать из материалов с большей температурой стеклования (T_g) — около $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $T_g = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 ($T_g = 150\text{...}160\text{ }^{\circ}\text{C}$), армированная высокосортной стеклотканью) и полиимидные платы могут использоваться для бессвинцовой пайки без ограничений. Дешевые материалы типа FR-1, FR-2, FR-3 с $T_g < 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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...150 °С, что приемлемо для бессвинцовой пайки. Но стоимость таких материалов более чем на 30% выше. Для удешевления в состав армирующих компонентов вводят целлюлозную (СЕМ-1) или стеклянную (СЕМ-3) бумагу (СЕМ – 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 [3].

1.10.3. Металлизация отверстий

Пластичность медных осадков должна соотноситься с температурным расширением основания плат по оси Z. Оно будет явно 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. Вышеописанное вынуждает пересмотреть нормы требований к технологии металлизации отверстий печатных плат [4].

1.10.4. Покрытия под пайку

Большое разнообразие финишных покрытий говорит об отсутствии выбора в пользу какого-либо одного-двух, удовлетворяющих всем требованиям по стоимости, смачиваемости, долговременности и т.д. Их перечень широк:

- OSP (Organic Solderability Preservative);
- NiAu (ENIG – Electroless Ni & Immersion Gold – химический никель и иммерсионное золото);
- ImAg (Immersion Ag);
- ImBi (Immersion Bi);
- Pd (Electroplate or Electroless Pd – химический или гальванический палладий);
- NiPd (Electroless Ni & Immersion Pd);
- NiPdAu (Electroless NiPd & Immersion Au);
- ImSn (Immersion Sn);
- NiSn (Electroplate Ni & Sn);
- SnAg (Electroplate Sn & Ag);
- HASL (Hot-Air Solder Leveling).

В этом ряду лидирующими покрытиями печатных плат под бессвинцовую пайку являются OSP, ENIG, ImAg, ImSn и HASL [2, 4].

HASL-процесс горячего облуживания плат состоит в их погружении на ограниченное время в ванну с расплавленным припоем. Во время быстрой выемки плат их облуживают струей горячего воздуха, которая сдувает излишки припоя и выравнивает покрытие. Но, несмотря на старания, наплывы припоя остаются. Особенно много их на развитых металлических поверхностях. В последующей сборке наплывы мешают установке мелких компонентов, что ограничивает применение HASL. Тем не менее с точки зрения качества и исключительной способности к пайке это покрытие, безусловно, наилучшее. Поэтому там, где изготовление плат и сборка происходят в одном производстве, всегда стараются найти компромиссы, чтобы использовать HASL.

Еще один существенный недостаток HASL-процесса — жесткий термоудар, который испытывают платы при погружении в расплавленный припой. Чем выше рабочая температура припоя, тем серьезнее проблема обеспечения надежности межсоединений. Ряд предприятий не использует HASL-процессы для многослойных плат, считая, что они уменьшают надежность внутренних межсоединений из-за таких термоударов. Поставляемые сегодня бессвинцовые припои для HASL-процессов имеют высокую (относительно оловянно-свинцовых припоев) температуру плавления и меньшую способность к смачиванию.

Покрытие OSP обеспечивает защиту медной поверхности от окисления в процессе хранения и пайки. В конце пайки этот слой, выполнив свою функцию, теряет способность обеспечивать последующие процессы пайки. В Японии это дешевое покрытие применяется уже более 20 лет. Но чтобы процесс пайки проходил в одну стадию группового нагрева, конструкторы изделий учитывают эту особенность в целях снижения себестоимости. OSP — хорошая альтернатива HASL. Но OSP имеет короткий жизненный цикл, что негативно сказывается на технологической надежности. Это покрытие не обеспечивает многократную пайку, тем более при высоких температурах. Чтобы избежать этих затруднений, приходится использовать азот в качестве нейтральной среды пайки.

Покрытие ENIG (~4 мкм Ni + ~0,1 мкм Au) — другая альтернатива HASL-процессам. Это покрытие свободно от ионных загрязнений и способно к многократной пайке при высоких температурах. Тонкий слой золота защищает никель от окисления, а никель становится барьером, предотвращающим взаимную диффузию золота и меди. Характерный для покрытия ENIG дефект — черные контактные площадки, появляющиеся на поверхности из-за выделения никеля и восстановленного фосфора. Во время пайки золото растворяется в припое и обнажает плохо паяемый слой фосфора. Припой скатывается с фосфорированной поверхности, из-за чего и проявляется эффект черной контактной площадки. Черные контактные площадки могут возникать также при передержке процесса пайки. Передержка интенсифицирует образование интерметаллидов олова с никелем и олова с фосфором, внед-

ренным в никель. Выделение фосфора на поверхности никеля может вызвать также процесс золочения. Осаждение золота из нейтральных электролитов уменьшает вероятность этих явлений [13].

ENIG капризно в выборе флюсов, а его цена примерно на 25% выше, чем у OSP. Преимущества ENIG:

- жизнеспособность более года;
- плоская контактная поверхность;
- хорошая смачиваемость припоем при правильном подборе флюса;
- неокисляемая поверхность нажимных и скользящих контактов.

Иммерсионное олово (ImmSn) — еще одна альтернатива HASL-процессам. Популярность ImmSn растет за счет обеспечения хорошей смачиваемости и простоты процесса осаждения. ImmSn демонстрирует лучшую паяемость, чем ENIG.

Существуют ограничения для применения ImmSn:

- самопроизвольные нитевидные кристаллические образования (усы), которые могут приводить к короткому замыканию;
- образование интерметаллических соединений Cu_xSn_y . При этом способность к пайке исчезает, поскольку толщина иммерсионного олова не превышает 1 мкм и Cu_xSn_y быстро поглощает этот тонкий слой. В последнее время возможность этого явления предотвращают введением барьерного подслоя различного содержания: металлоорганика и др.

Но у ImmSn есть и преимущества:

- низкая стоимость процесса осаждения;
- хорошая паяемость;
- плоская поверхность покрытия (в отличие от HASL);
- хорошие условия для обеспечения беспаянных соединений Press-Fit (впрессовывание штырей-хвостовиков разъемов в металлизированные отверстия плат).

Иммерсионное серебро (ImmAg). Толщина ImmAg не превышает 200 нм, поэтому расходы на реализацию этого покрытия незначительны. Жизнеспособность ImmAg гораздо выше, чем OSP, но несколько меньше, чем ENIG. Изменение цвета покрытия в процессе хранения, сборки и пайки — результат загрязнения воздушной среды сульфатами и хлоридами. Пожелтение не сказывается на свойствах ImmAg, но декоративность покрытия при этом страдает. Консервирующие покрытия антиокислителей тормозят процесс пожелтения и продлевают жизнеспособность покрытия. ImmAg менее популярно в Европе, чем в США, где оно более доступно [14].

1.11. Заказчик и производитель

Обычно Заказчик приходит в производство со своими компонентами и печатными платами. И зачастую он обнаруживает полную непригодность его

печатных плат для автоматизированного сборочно-монтажного производства. К сожалению, отечественная стандартизация на проектирование и производство электронных модулей пока что (2007 г.) отсутствует. Фирмы и группы инженеров, специализирующиеся на проектировании электронных изделий, пользуются стандартами IPC и опытом, наработанным на стыке проектов и их промышленной реализации. К сожалению, еще не созданы общие правила проектирования применительно к современным условиям производства. Востребованность в этом давно существует, можно ожидать на нее положительного отклика.

Тем не менее практика взаимоотношений между Заказчиком и Производителем установила определенные правила взаимоотношений.

1.11.1. P-CAD или GERBER?

Один из первых вопросов, который возникает при размещении заказа, — вопрос о входном формате файлов. Обычно Производитель принимает заказы в любом формате. Но общепринято передавать заказы в формате GERBER. Почему?

Универсальность

Практически любое технологическое оборудование, от сверлильных станков и фотоплоттеров до станков для V-надрезки, «понимает» GERBER в качестве входного формата. В то же время системы проектирования типа P-CAD, OrCAD и т.п. имеют встроенные постпроцессоры для связи проекта с технологическим оборудованием. Но перечень этого оборудования, естественно, охватывает далеко не весь парк машин. Для решения этой проблемы для того же P-CAD написаны гигабайты всевозможных трансляторов и постпроцессоров. Но доверие к ним сомнительно.

Ответственность

Ответственность за соответствие изготовленной печатной платы проекту несет обычно Производитель. Но при подготовке производства проект всегда подвергается обработке CAM-CAD: в файл добавляют различные технологические элементы, мультиплицируют, пропускают через различные трансляторы. Это производственная необходимость, но она может невольно внести погрешность в проект Заказчика. Например, при мультипликации плат в P-CAD могут пропадать проводники. Конечно, если это произойдет, будет виноват Производитель. Но часто эта ошибка провозируется файлом Заказчика, подготовленным в нелицензионной версии P-CAD. Подобных неприятностей можно избежать, используя все тот же GERBER-формат.

Безопасность

Выходной файл любой CAD-системы содержит намного больше информации о проекте, чем GERBER-файл. Передавая, например, PCB-файлы системы P-CAD Производителю, Заказчик доверяет ему свою интеллекту-

альную собственность в виде, доступном для дублирования, редактирования и прочих нарушений авторских прав Заказчика. В этих файлах, как правило, содержится информация не только о самой печатной плате, но и об установленных на плате элементах, связях между ними и т.п. В то же время GERBER-файл содержит лишь графическую информацию о плате.

Свобода действий

Если Заказчик располагает GERBER-файлом своего проекта, он обладает большей свободой действий в выборе производителей печатных плат. Он может размещать заказы и в России, и за рубежом, и всегда будет однозначно понят Производителем. В случае, например, отличий топологии изготовленной платы от проекта Заказчик всегда будет прав.

Несмотря на вышеизложенное, все производители размещают на своих сайтах инструкцию по подготовке файлов, спроектированных в P-CAD, к передаче Производителю. Но предпочтительнее все же передать производителю свой проект в GERBER-файле. Это сэкономит время и позволит избежать возможных недоразумений.

1.11.2. 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 $\varnothing 2,7^{+0,06}$ мм или $3,0^{+0,06}$ на расстоянии 5,0...5,5 мм от края длинной стороны и не более 20 мм от края коротких сторон для перемещения платы для позиционирования (рис. 1.28). Фиксирующие отверстия ПП, необходимые для закрепления на координатном или рабочем столе технологического оборудования, выполняются по квалификации 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...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...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. 1.28).

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.

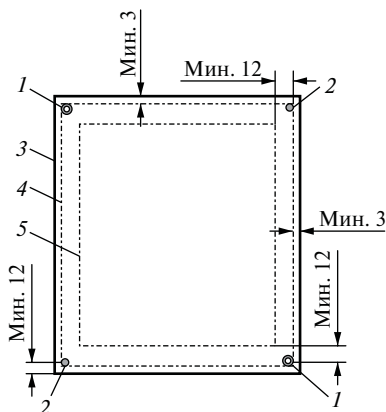


Рис. 1.28. Размещение реперных знаков на заготовке ПП: 1 – базовые отверстия; 2 – реперные знаки; 3 – периметр заготовки ПП; 4 – периметр мультиплицированной заготовки (панели), поступающей на сборку; 5 – рабочее поле заготовки, на котором размещаются платы

9.2. Переходные отверстия должны находиться вне контактных площадок для монтажа выводов SMD-компонентов. Переходные отверстия $\varnothing 0,6$ 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. 1.29).

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 коробление

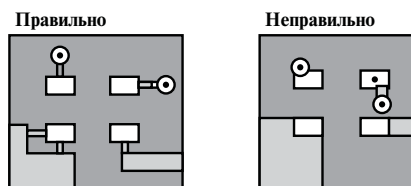


Рис. 1.29. Контактные площадки отверстий и контактные площадки для монтажа компонентов должны соединяться (при необходимости) проводниками номинальной ширины (правильно) и не выполняться общим массивом (не сливаться), что было бы неправильно

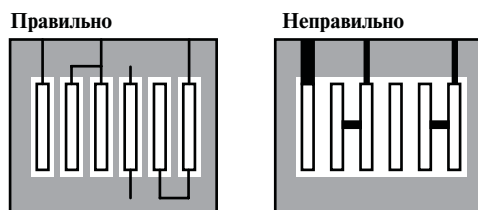


Рис. 1.30. Правила соединений соседних контактных площадок

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. Недействующие 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. 1.30).

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. 1.31).

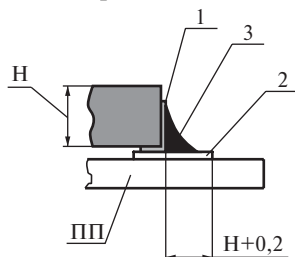


Рис. 1.31. Выбег контактной площадки из-под безвыводных компонентов

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

24. Следует сокращать количество типономиналов корпусов компонентов в пределах одного проекта платы и изделия в целом, так как это сокращает время на подготовку производства и сборку. Рекомендуется заменять уникальные типономиналы 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 типов-размеров 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 типономинала 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 (см. п.8). Тогда для отделения одной платы от другой необходимо предусмотреть фрезеровку их контура с легко переламинаемыми перемычками или скрайбирование (надрезы) контура для удобства последующего отделения плат от панели, например, роликовыми ножницами. Можно предусмотреть и то и другое, если контуры плат отличаются от прямых линий.

1.11.3. Оформление конструкторской документации

1. Вся конструкторская документация должна быть выполнена в соответствии с ЕСКД (сборочный чертеж и спецификация).

2. При разработке КД необходимо выполнять требования ОСТ 4.42.02-93 пп. 9.4...9.7 (схема нанесения точек клея, направления пайки, таблица координат центров компонентов...). Толщина припоя на контактных площадках для SMD-компонентов должна составлять 8...25 мкм.

3. Спецификация должна содержать следующую информацию: наименование компонента (детали, материала), номинал, допуск, тип корпуса,

позиционное обозначение, количество, номер чертежа деталей, вариант исполнения.

4. Сборочный чертеж обязательно должен содержать: виды, сечения, разрезы и размеры, необходимые для изготовления электронного модуля, технические требования к установке и монтажу компонентов с указанием необходимых стандартов, применяемые материалы, варианты установки компонентов, выноски на нестандартную установку компонентов, номера позиций деталей и т.п.

5. Графическое изображение каждого из типов корпусов SMD-компонентов и других ЭРЭ на сборочном чертеже должно быть единым для всех изделий предприятия-разработчика. Изображение должно быть четким, понятным и максимально приближенным к конфигурации реального корпуса. Обозначение полярности (ключа) должно быть однозначным и соответствовать реальному виду (точка, скос, выступ и т.д.).

1.12. Заключение

Постоянная тенденция в развитии элементной базы — увеличение функциональности интегральных микросхем и мини- и микроминиатюризация всех компонентов, вплоть до развития технологий: «кристалл на плате», многокристальные модули и выполнение компонентов в микрокорпусах. Стремление уменьшить монтажное поле под компонентами побуждает переходить от системы периферийных выводов к матричной системе. Поэтому компоненты в корпусах типа BGA — это сегодняшняя реальность и то, что всех непременно ожидает в будущем. Технологии печатных плат вынужденно поддерживают общее стремление к миниатюризации: плотность межсоединений в платах постоянно растет за счет использования развитых многослойных структур и уменьшения размеров трассировок. Перенос пассивных компонентов (в первую очередь резисторов) в структуру плат уже широко используется в зарубежной практике. Встраивание активных компонентов в объем плат — веление времени.

Уменьшение размеров элементов межсоединений, сопровождающееся естественным уменьшением их прочности, в сочетании с увеличением термомеханических нагрузок бессвинцовой пайки создает много проблем обеспечения надежности.

Расширяющаяся номенклатура компонентов и материалов для различных применений постоянно пополняет информационную базу и создает возможности создания большого разнообразия конструкций электронных изделий. Владение правилами проектирования в развитой среде CAD-CAM позволяет не только быстро генерировать новые и новые проекты, но и без излишних настроек осваивать их производство и выходить на рынок.

Литература

1. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник. — М.: Форум: Инфра-М, 2005.
2. Капица М.С. Технология производства печатных плат: Учеб. пособие по одноименному курсу для студентов специальности 1-48 01 04. «Технология электрохимических производств» — Минск: БГТУ, 2005.
3. Медведев А. Печатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера, 2005.
4. Медведев А. Технология производства печатных плат. М.: Техносфера, 2005.
5. Технологии в производстве электроники. Сборник статей специалистов инжиниринговой компании «Электрон-Сервис-Технология», опубликованных ими в официальных изданиях. Часть 1. М.: Make-Up-Print, 2006.
6. Печатный монтаж (CircuiTree). Приложение к журналу «Электроника: Наука, технология, бизнес» ЗАО «РИЦ «Техносфера».
7. Электроника: Наука, технология, бизнес. ЗАО «РИЦ «Техносфера».
8. Производство электроники. Технологии, оборудование, материалы. М.: ИД «Электроника»
9. Технологии приборостроения. М.: ИД «Технологии».
10. Технологии в электронной промышленности. Тематическое приложение к журналу «Компоненты и технологии». СПб: Fine Street.
11. Григорьев В. Бессвинцовая технология — требование времени или прихоть законодателей от экологии? // Электронные компоненты, 2001, № 6.
12. J-STD-020-B. Стандарт для определения чувствительности к влаге в процессе пайки оплавлением негерметичных твердотельных компонентов для SMT-монтажа.
13. The Black Pad Failure Mechanism — From Beginning to End // Ronald A. Bultwith, Michael Trosky, Louis Picehione, Darlene Hug // Cookson Electronics Assembly Materials Group — Alpha Metals, Global SMT and Packaging Journal, Sept. 2002.
14. Global trend of lead-free Soldering and technologies // John H. Lau and Katrina Lin. SMT Chine.

ГЛАВА 2

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОНТАЖНОЙ ПАЙКИ

2.1. Классификация способов нагрева

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 так или иначе 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).

2.2. Процессы на границе раздела

Развитие процессов на границе раздела: припой — спаиваемые поверхности — проходит несколько стадий: адсорбция — адгезия — смачивание — физическое растворение или поверхностные химические реакции — сцепление.

2.2.1. Первая стадия — адсорбция

Энергия взаимодействия поверхности тела с газовой фазой или разбавленным раствором вызывает избирательное концентрирование одного из веществ (компонента раствора) на поверхности тела или в приповерхностном слое. Такое явление называется адсорбцией. Вещество, на поверхности ко-

торого происходит адсорбция, называется адсорбентом, а адсорбируемое вещество — адсорбатом. Обратный адсорбции процесс — процесс отделения от поверхности ранее адсорбированного вещества — называется десорбцией.

Различают два вида адсорбции: физическую и химическую (хемосорбцию). При физической адсорбции энергия взаимодействия между адсорбатом и поверхностью не столь значительна, чтобы изменить физико-химическую природу адсорбата, а следовательно, и его свойства. При хемосорбции образуется химическая связь между поверхностью и адсорбируемым веществом. Физическая адсорбция вызывается Ван-дер-ваальсовыми силами и протекает очень быстро, особенно при понижении температуры поверхности. Хемосорбция при низких температурах протекает медленно, но при повышении температуры ее скорость быстро растет подобно поведению химических реакций. Энергия физической адсорбции соизмерима с теплотой конденсации (испарения). Для органических растворителей она составляет 8...15 кДж/моль, для металлов — 10...40 кДж/моль, поэтому физическая адсорбция обратима и энергетическое состояние адсорбированных молекул мало отличается от свободных.

Энергия хемосорбции сравнима с теплотой химических реакций (50...400 кДж/моль). Как всякая химическая реакция, хемосорбция сопровождается изменением электронной структуры взаимодействующих молекул. В отличие от обычных химических реакций хемосорбция протекает только в мономолекулярном слое на поверхности раздела фаз.

Количественную характеристику адсорбции, как изменение химического потенциала и поверхностного натяжения соответствующего компонента при адсорбции, можно описать с помощью соотношения

$$dC_i/dS_{\Pi} = -\partial\sigma_s/\partial\mu_i,$$

где C_i — концентрация i -го компонента, S_{Π} — поверхность раздела, σ_s — поверхностное натяжение, μ_i — химический потенциал i -го компонента.

Пусть $dC_i/dS_{\Pi} = \Gamma$ — избыток массы компонента на единице поверхности раздела по сравнению с единицей объема соприкасающихся фаз. Так как

$$\partial\mu_i = RT(dC_i/C_i) = RT(dp/p), \text{ то } \Gamma = -\frac{C_i}{RT}\left(\frac{\partial\sigma_s}{\partial C_i}\right)_{T,p} = -\frac{p}{RT}\left(\frac{\partial\sigma_s}{\partial p}\right)_{T,C_i},$$

где $\partial\sigma_s/\partial C_i$ — поверхностная активность адсорбируемого компонента.

Последнее выражение называется адсорбционным уравнением Гиббса. В соответствии с этим уравнением на поверхности раздела адсорбируются вещества, понижающие ее поверхностную энергию относительно окружающей среды, что уменьшает общую свободную энергию системы. Очевидно, что количество адсорбируемого вещества пропорционально площади поверхности раздела.

Обычно из растворов сильнее адсорбируются те вещества, которые меньше растворимы в данном растворе. Согласно уравнению Гиббса адсорбируемые вещества снижают поверхностное натяжение растворителя. Вещества, сильно уменьшающие поверхностное натяжение растворителя, называют поверхностно-активными (ПАВ).

2.2.2. Вторая стадия – адгезия

Адгезия и адсорбция развиваются только на поверхности без образования промежуточных слоев. Расстояние, на котором действуют адгезионные силы, не превышает нескольких нанометров. Для адгезии важно обеспечить благоприятные энергетические условия, облегчающие переход от Ван-дер-ваальсовых сил физической связи к более прочным ионным и ковалентным силам химической связи. Последнее требование реализуется при активации атомов и молекул, находящихся на поверхности. *Активация* осуществляется:

- при нагревании тел;
- химическим растворением и удалением загрязнений поверхности;
- механическим удалением микронного слоя с соприкасающихся материалов;
- сублимацией загрязнений в вакууме;
- ионно-плазменной очисткой и т.п.

Анализировать факторы, стимулирующие и подавляющие адгезию, без учета природы конкретных материалов подложки и пленки, не представляется возможным, так как характер их взаимодействия зависит не только от параметров состояния (температуры, состава, давления), но и от природы взаимодействующих материалов. Можно лишь провести качественную оценку взаимодействующих поверхностей, исходя из их химической природы. Ориентиром в таких оценках может служить сродство химической основы соединяемых материалов.

Экспериментальное определение силы адгезии основано на том факте, что она равна по значению, но обратна по знаку силе отрыва пленки от подложки. Поэтому силу адгезии рассчитывают по усилию отрыва.

2.2.3. Третья стадия – смачивание

Смачивание соединяемых поверхностей жидким припоем или расплавом при микросварке проявляется как растекание капель жидкости на твердом теле или как оттекание, когда слой жидкости собирается в капли. Поверхностный слой любого тела обладает избытком энергии (поверхностная энергия). Для атомов, молекул и ионов, находящихся на поверхности раздела фаз, характерно наличие нескомпенсированных сил, т. е. они являются источниками силового поля. Это силовое поле вызывает сжатие поверхностного слоя, возникают силы упругости.

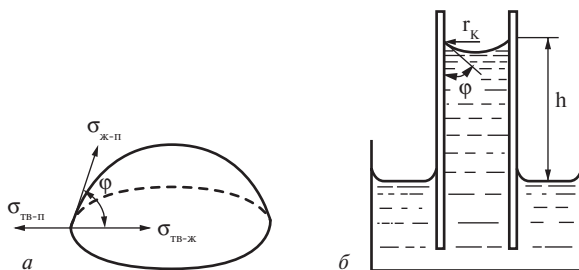


Рис. 2.1. Форма капли жидкости на твердой поверхности

Степень смачивания характеризуется видом и степенью искривления поверхности жидкости в месте соприкосновения трех фаз: твердой, жидкой и паровой (газовой или атмосферной). Такое искривление называют мениском (рис. 2.1). Степень смачивания определяет форму капли жидкости на твердой поверхности. Мерой смачивания обычно служит контактный угол (угол смачивания) φ между смачиваемой поверхностью и поверхностью жидкости по периметру смачивания (рис. 2.1, а).

Условие равновесия соприкасающихся фаз описывается уравнением

$$\sigma_{тв-п} = \sigma_{тв-ж} + \sigma_{ж-п} \cdot \cos \varphi$$

Отсюда

$$\cos \varphi = (\sigma_{тв-п} - \sigma_{тв-ж}) / \sigma_{ж-п}.$$

Если $\sigma_{тв-ж} < \sigma_{тв-п}$, то $\varphi < \pi/2$. В этом случае жидкость имеет вогнутый мениск (хорошо смачивает поверхность твердого тела). Если $\sigma_{тв-ж} > \sigma_{тв-п}$, то $\varphi > \pi/2$. При этом условии жидкость имеет выпуклый мениск (плохо смачивает поверхность).

В капилляре радиусом r_k уровень смачивающей жидкости выше, чем в сообщающемся с ним широком сосуде (рис. 2.1, б), на высоту капиллярного подъема жидкости:

$h = (2\sigma \cdot \cos \varphi) / (r_k \cdot \rho \cdot g)$, где ρ — плотность жидкости; g — ускорение силы тяжести.

2.2.4. Четвертая стадия – поверхностные реакции

В результате смачивания создаются условия для развития вторичных процессов физического растворения и поверхностных химических реакций, при протекании которых происходит взаимодействие, ведущее к образованию переходной зоны на границе раздела фаз.

При *физическом растворении* взаимодействуют вещества одинаковой природы, смешение происходит только за счет кинетической энергии атомов, ионов, молекул, не претерпевающих изменений.

Поверхностные химические реакции возможны в том случае, когда химическая природа соприкасающихся фаз различна. Поверхностные химические соединения, образуемые в результате этих реакций, не представляют отдельной самостоятельной фазы. Продукты поверхностных реакций можно рассматривать как химические соединения переменного состава. Вступившие в поверхностную реакцию атомы и ионы твердого тела не порывают связей с атомами и ионами собственной кристаллической решетки.

2.2.5. Пятая стадия – сцепление

Характерным признаком полного сцепления служит образование промежуточного слоя химического или физического происхождения. Образование промежуточного слоя между покрытием и подложкой – характерный признак сцепления. При этом могут возникать две межфазовые границы раздела: покрытие – промежуточный слой и промежуточный слой – подложка. Они бывают размытыми или четко выраженными. Процесс сцепления всегда требует некоторого времени, потому что связан с протеканием поверхностных реакций, растворения и диффузии.

2.2.6. Стадии физико-химического процесса пайки

Стадии образования соединения: активация металлических поверхностей флюсом, нагрев поверхностей выше точки плавления припоя, вытеснение флюса припоем, растекание жидкого припоя – процесс смачивания, взаимная диффузия припоя и соединяемых поверхностей – образование сплавной зоны, химическое взаимодействие припоя и соединяемых поверхностей (рис. 2.2).

Наличие зон сплавления (диффузионных зон) является признаком образования металлической связи с полными свойствами электрической

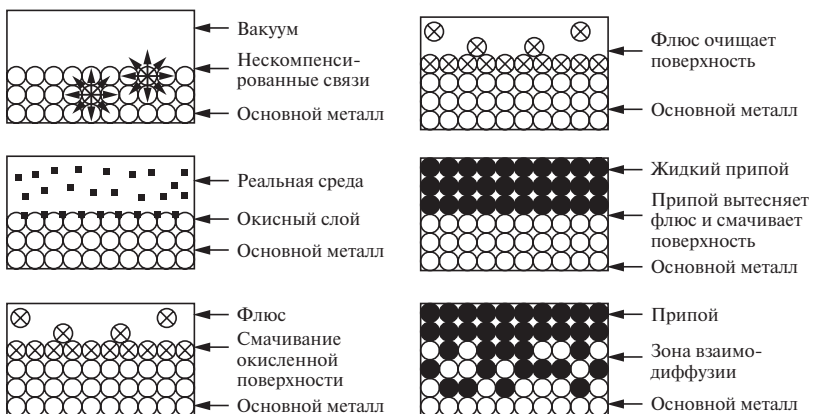


Рис. 2.2. Стадии образования паяного соединения

проводимости по металлу. Отсутствие диффузионной зоны указывает на недостаточную связь, т. е. на наличие «холодной» пайки: электрическое соединение неустойчиво. Сравните λ -характеристики (интенсивность отказов):

«Холодные» пайки	10^{-2} ч^{-1}
Обычное паяное соединение	10^{-10} ч^{-1}
Соединение с зоной сплавления	10^{-13} ч^{-1}

При правильном выполнении пайки прочность паяного шва всегда больше прочности припоя. Поэтому надо стремиться к минимальным зазорам пайки. В то же время очень узкие зазоры могут быть незаполнены припоем, и в паяном шве останутся пустоты, заполненные коррозионной средой — флюсом с растворенными в нем загрязнениями.

Конструкция паяного узла поддается расчету:

- соотношение между величиной зазора u и высотой h заполнения припоем вертикального паяного шва:

$$h = 2 \delta \cos \alpha / \rho g u,$$

где δ — поверхностное натяжение на границе припой-флюс; α — угол смачивания; ρ — плотность припоя; g — ускорение земного тяготения;

- продолжительность заполнения припоем горизонтального паяного шва:

$$t = 6JL(+2) / u \cos \alpha,$$

где t — продолжительность времени пайки; J — вязкость припоя;

L — длина паяного шва.

Величина паяного зазора сказывается на надежности паяного узла таким образом, что при зазорах менее 0,2 мм заполнение зазора припоем затруднено, а при зазорах более 0,6 мм резко увеличивается частота отказов паек. Оптимальная ширина зазора — 0,3...0,4 мм.

2.3. Процессы нагрева при пайке

2.3.1. Общие вопросы монтажной пайки

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 одним эти функции. Но паяльник — руч-

ной инструмент, управляемый человеком, поэтому процесс пайки паяльником с трудом поддается управлению. В связи с этим λ -характеристика паек, выполненных вручну, по всем стандартам оценивается на два-три порядка хуже максимально достижимой. Остальные виды селективной пайки поддаются разделению операций: нанесение флюса, припой, придавливание 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 поверх-

ности, 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.

2.3.2. 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. 2.3).

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.

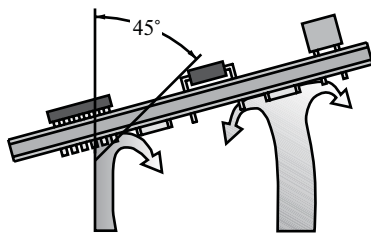


Рис. 2.3. Схема пайки волной припоя

2.3.2.1. Технологические этапы процесса волновой пайки

Технологические этапы:

- 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 термодару 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.

2.3.2.2. Блок флюсования

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.

2.3.2.3. Предварительный нагрев

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.

2.3.2.4. Процесс пайки

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. Каждый производитель использует свою собственную форму волны: Ω , λ , Z , T -образные и др. Направление и скорость движения по-

тока 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.

2.3.2.5. Охлаждение

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.

2.3.2.6. Особенности пайки волной припоя

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. 2.4).

Для обеспечения эффективности пайки все параметры каждой волны должны быть регулируемы. 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.

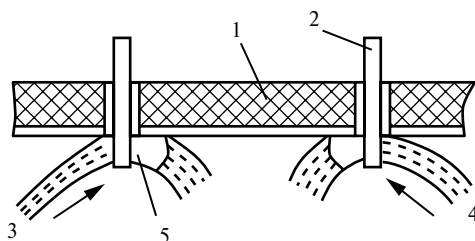


Рис. 2.4. Образование и устранение теней при пайке волной припоя: 1 — плата с монтажными отверстиями; 2 — штыверный вывод компонента; 3 — попутная струя волны; 4 — встречная струя волны; 5 — затенение

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 поверхности 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 50T-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 (непропаи);
- большое количество дефектов паек при малом расстоянии между монтажными элементами.

2.3.3. Инфракрасная пайка

Для ИК-нагрева используются специальные лампы накаливания и рефлекторы, как правило, эллиптические (рис. 2.5). 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». Непременно нужно говорить о конкретном диапазоне ИК-излучателей:

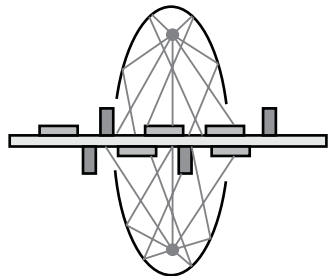


Рис. 2.5. Схема ИК-нагрева

- 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.

Плотность энергии излучения черной поверхности (в соответствии с законом Стефана-Больцмана) пропорциональна четвертой степени ее абсолютной температуры. Длина волны, на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре (Закон смещения Вина):

$$\lambda_{\max} = b/T \text{ где } b = 2898 \text{ мкм} \cdot \text{К}.$$

В соответствии с этим законом можно говорить о длине волны, на которую приходится максимум излучения:

Температура, °С	60	100	200	300	400	600	1000	2000	3000
Длина волны, мкм	9	8	6	5	4,5	3	2,3	1,3	0,9

Все лампы накаливания и горячие источники имеют максимум излучения в ИК-диапазоне, но в разных областях этого диапазона:

Тип излучателя	Область излучения	Плотность мощности излучения, Вт/см ²	Преимущества и недостатки
Лампа накаливания с вольфрамовой нитью и внутренним рефлектором	Ближняя ИК-область спектра	300	Затенение высокими компонентами. Высокий градиент температур от поверхности в объем. Чувствительность к цвету компонентов
Панель из трубчатых вольфрамовых ламп накаливания	Ближняя ИК-область спектра	50	Высокий градиент температур от поверхности в объем. Чувствительность к цвету компонентов
Панель из трубчатых ламп с никромовыми нитями накаливания	Средняя ИК-область спектра	30	Преимущество для большой плотности монтажа. Низкая чувствительность к цвету компонентов
Панель из тепло-электронагревателей (ТЭН)	Дальняя ИК-область спектра	4	Отсутствие затенения. Отсутствие чувствительности к цвету компонентов

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 в глубь материала. ИК-нагрев в ближней области спектра создает преимущественно поверх-

ностный нагрев с неглубоким проникновением вглубь, поэтому он часто используется для оплавления покрытий плат. Но для пайки оплавлением паст и для сушки клея эта ИК-область неприемлема, поскольку при ее использовании в первую очередь нагревается поверхность, за счет чего образуется поверхностная пленка (рис. 2.6). При продолжающемся нагреве вскипающие летучие взрывают эту пленку, вызывая разбрызгивание продуктов объема с образованием шариков припоя (рис. 2.6, *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. 2.6, *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.

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).

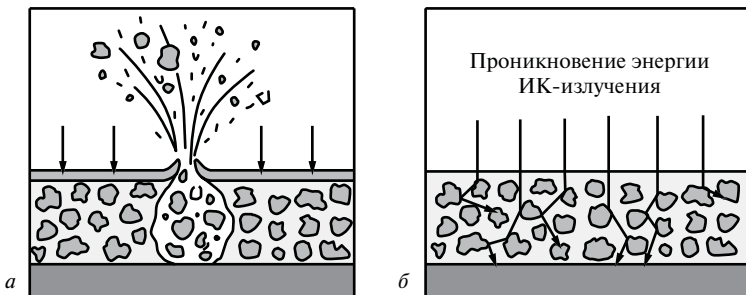


Рис. 2.6. Преимущества использования средне- и длинноволнового ИК-нагрева: *а* — последствия образования поверхностной пленки при нагреве в ближней области ИК-спектра; *б* — равномерное проникновение энергии излучения в объем паст при нагреве в средней и длинной областях ИК-спектра

Простые установки ИК-оплавления использовали для нагрева лампы-ИК-излучатели с вольфрамовыми нитями накаливания с температурой их нагрева 700...800 °С. Поскольку температура пайки составляет 220...230 °С, 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...10 мкм). Конструктивно такие излучатели представляют собой керамические панели больших размеров с температурой излучающей поверхности 280...320 °С. 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. 2.7. 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

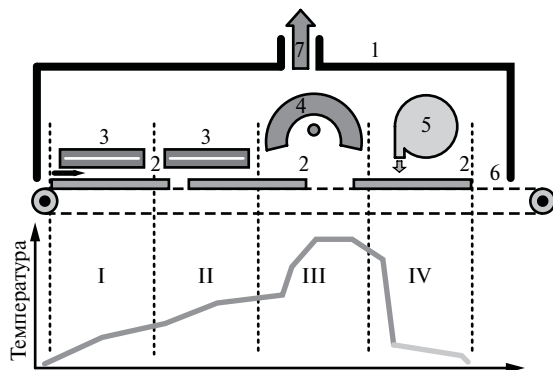


Рис. 2.7. Схема установки для ИК-пайки

дисплея. Характеристики температурного профиля, т. е. значения температур в каждой зоне, возможно 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.

2.3.4. Конвекционный нагрев

В печах конвекционной пайки или оплавления в качестве нагревателей используют мощные калориферы, но могут использовать и ИК-излучатели. Тепло в этих печах переносится преимущественно за счет принудительного движения газовой среды встроенными вентиляционными системами. По-

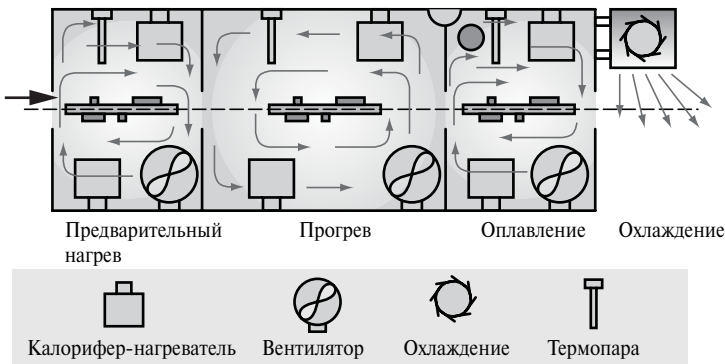


Рис. 2.8. Конвейерная печь с конвекционным нагревом

Температура, °C

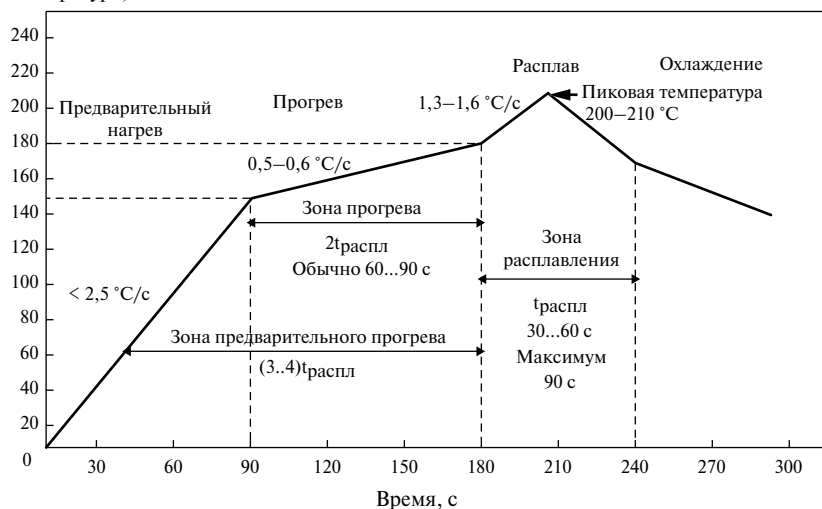


Рис. 2.9. Термопрофиль печи конвекционного типа

токи горячего газа (чаще азота, возможно воздуха) более равномерно прогревают изделия, снимают температурные перепады и, что самое главное, позволяют более эффективно управлять температурным профилем в печи. В серийном производстве используют конвейерные печи типа показанной на рис. 2.8. В них температурный профиль распределяется в пространстве печи от одной зоны к другой, и изделия последовательно проходят эту череду зон, принимая соответствующие температуры, как показано на рис. 2.9. Эти печи занимают большие производственные площади, потребляют значительную энергию для нагрева рабочей среды. Поэтому в прототипном производстве используют камерные печи, в которые загружаются изделия, и температурный профиль в них устанавливается управляемым во времени нагревом и охлаждением.

В конвекционной печи плата поочередно проходит как минимум четыре температурные зоны:

Зона предварительного нагрева (25...150 °C)

Удаление летучих компонентов из флюса.

Плавный нагрев платы и компонентов.

Температурный градиент не должен превышать $2,5 \text{ }^{\circ}\text{C/с}$.

Зона прогрева (150...180 °C)

Начало активизации флюса, смачивание выводов компонентов и контактных площадок платы и удаление окислов.

Температура платы и компонентов достигает температуры плавления припоя.

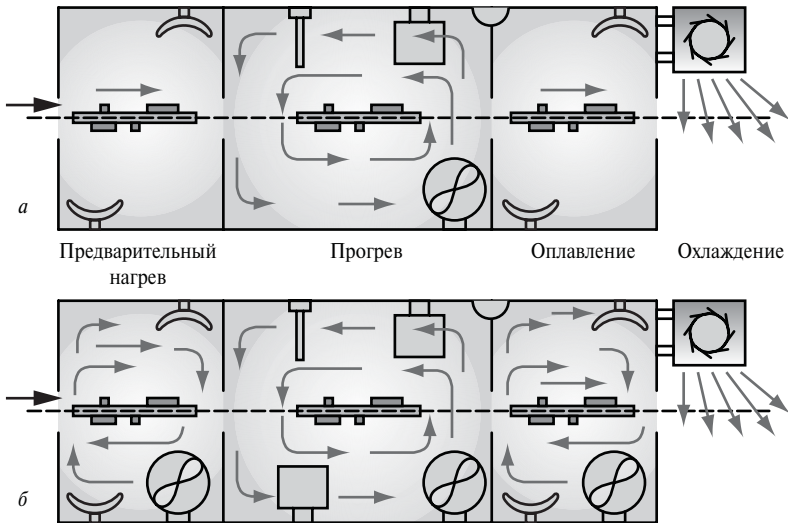


Рис. 2.10. Печь инфракрасного нагрева (а) и смешанного: ИК и конвекционного нагрева (б)

Уравновешивается температура компонентов разной массы и размеров. Активированный флюс защищает паяемые поверхности от окисления.

Зона расплавления припоя — пайки ($200...210^{\circ}\text{C}$)

Оплавление паяльной пасты.

Активированный флюс снижает поверхностное натяжение паяльной пасты и повышает смачиваемость паяемых поверхностей.

Зона охлаждения ($30...50^{\circ}\text{C}$)

Плавное снижение температуры для равномерного охлаждения компонентов и платы.

К недостаткам конвекционных печей можно отнести большой цикл установления устойчивых температурных профилей. При перерывах в работе (односменный или двухсменный режим) приходится считаться с необходимостью ожидания выхода печи на режим и технологического тестирования качества пайки до первого запуска изделия на пайку.

Поэтому достаточно часто встречается комбинация конвекционного и ИК-нагрева, как это показано на рис. 2.10.

2.3.5. Конденсационная пайка

Технология конденсационной пайки (пайки в парогазовой фазе) основана на нагреве монтируемых узлов в парофазной среде за счет конденсации пара рабочей жидкости на холодной поверхности монтируемого изделия. Жидкости конденсируются на плате, отдавая скрытую теплоту парообразо-

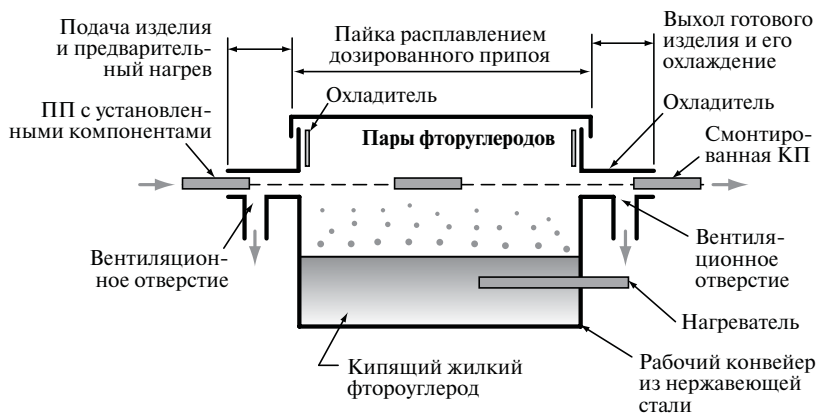


Рис. 2.11. Схема конденсационного нагрева

вания (рис. 2.11). В качестве жидкости, пары которой конденсируются при температурах пайки, используют нагревостойкие низкомолекулярные полимеры класса фторуглеродов или галогенуглеродов с температурой кипения 210...260 °С. Для пайки используются припойные пасты.

Этот метод пайки обеспечивает самый «мягкий» нагрев в сопоставлении со всеми другими методами нагрева. В данном случае «мягкая» пайка означает почти полное отсутствие температурных градиентов по поверхности монтируемого изделия и компонентов и полную невозможность перегрева, поскольку температура нагрева не может быть выше температуры кипения (конденсации) рабочей жидкости. Для нее не требуется подбор температурного профиля: все компоненты и плата прогреваются равномерно. Так как воздух из зоны пайки вытесняется инертным фторуглеродным паром, пайка производится практически в бескислородной среде. Поэтому можно использовать слабоактивированные флюсы. После пайки не требуется операция отмывки, так как конденсирующиеся на поверхности плат пары рабочей жидкости смывают все остатки флюса и загрязнения.

Все это обусловило ее преимущественное применение в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства. Недостатком пайки в паровой фазе является большой расход рабочей жидкости, что сказывается на себестоимости изделий.

Повышение температуры платы от ее начальной температуры (например, окружающей среды перед пайкой) до температуры расплавления припоя осуществляется очень быстро и не поддается регулированию. Поэтому целесообразен предварительный подогрев платы с компонентами для уменьшения термических напряжений в компонентах и местах их контактов с платой. Температура нагрева припоя также не регулируется и равна температуре кипения используемой при пайке жидкости. Ванна с паровым нагревом встраивается в конвейерную линию, как правило, с модулем предваритель-

ного ИК-нагрева. В качестве конденсационной среды используют инертный фторуглерод, например РС-70.

Существует два типа установок для пайки в парогазовой фазе: с применением одной либо двух рабочих жидкостей. В первых установках для пайки применялись две рабочие жидкости, при этом использовалось обычно несколько установок пайки в составе производственной линии. С целью предотвращения утечки паров дорогого фторуглерода поверх основной технологической среды из инертного фторуглерода создавалась дополнительная технологическая среда из более дешевого фреона. Основным недостаток этих установок состоял в том, что на границе двух технологических сред происходило образование различных кислот. Поэтому необходимо было обеспечивать защиту плат управления от разрушающего действия кислот на материал платы. Кроме того, рабочая часть контейнера установки пайки должна изготавливаться из коррозионно-стойкого материала, что отражается на стоимости такого оборудования. Требовались системы нейтрализации кислот. Поэтому установки для пайки с двумя рабочими жидкостями оказались малоприменимы для линий электронной аппаратуры.

Позже стали выпускаться установки для конденсационной пайки, встраиваемые в технологические сборочно-монтажные линии. Такие установки имеют относительно небольшие входные и выходные шлюзы, позволяющие уменьшить утечку среды и реализовать систему с одной технологической средой. Показанная схематично на рис. 2.11 конструкция обеспечивает возможность включения установки в состав технологической линии.

2.3.6. 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.

Локальный нагрев осуществляют тремя способами: контактным, струйным, лучевым.

2.3.6.1. 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

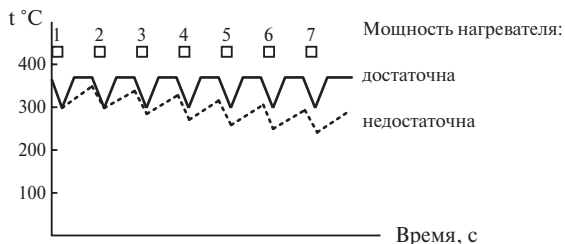


Рис. 2.12. Изменение температуры жала паяльника от одной точки пайки к другой

электрический нагрев жала паяльника. Температуру жала паяльника стандартно устанавливают на 30...40 °С выше температуры плавления припоя. Но также успешно практикуется перегрев жала паяльника на 70...90 °С. 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. 2.12).

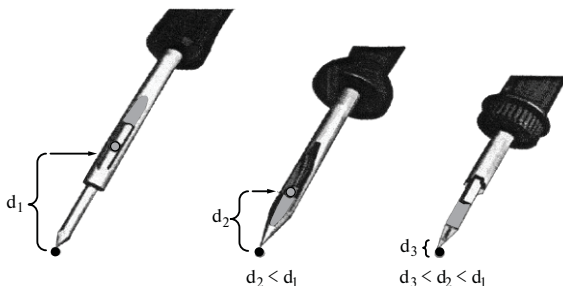


Рис. 2.13. Конструкции паяльников: черный кружок — точка пайки; серый кружок — датчик температуры; серое тело — нагреватель

Увеличением теплоемкости жала паяльника это явление не скомпенсируешь, так как следствием его является увеличение времени нагрева инструмента. Проблему решают, как показано на рис. 2.13:

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

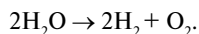
2.3.6.2. Пайка горячим газом

Локальный струйный нагрев горячим газом или пламенем основан на подаче в зону паяного шва остро направленного потока, диаметром менее 0,5 мм,

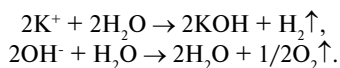
вызывающий повторное расплавление нанесенной при лужении дозы припоя. Припаяваемые выводы элементов должны быть прижаты к контактной площадке на все время пайки вплоть до затвердевания припоя. В качестве газа-теплоносителя применяют аргон, гелий, азот при температуре струи 300 °С. Скорость пайки шва составляет 2 мм/с.

Более высокую производительность дает применение остро направленного факела пламени, в конусе которого температура может достигать 3400 °С (горение водорода в кислороде). Конец факела пламени удерживают на расстоянии 2...6 мм от поверхности контактной площадки, покрытой припоем и флюсом. Стабильность температуры зависит от точности поддержания расстояния между концом сопла и поверхностью пайки (обычно 17...18 мм при длине пламени 14 мм) и от точности поддержания длины пламени. Длина пламени зависит от состава смеси водород—кислород.

Высокой стабильности соотношения газов легко и безопасно можно достичь, используя в качестве общего источника газов дистиллированную воду, подвергаемую электролитическому разложению в газообразователе, входящем в состав установки для пайки. В качестве электролита применяют 29,4%-й водный раствор гидроксида калия. При этом образуется строго определенное стехиометрическое соотношение водорода и кислорода:



При электролизе водного раствора КОН он диссоциирует на K^+ и OH^- , которые сразу вступают в реакции:



В результате расходуется только вода, которую необходимо добавлять (в виде дистиллята).

Горелка для струйного нагрева представляет собой тонкое сопло в виде медной трубки с внутренним диаметром 0,3...0,4 мм. Происходит полное сгорание. Продуктом реакции является только бесследно испаряющаяся пленка воды. В газообразователе предусмотрены накопитель и предохранитель, устраняющие опасность взрыва при обратной отдаче пламени.

При добавке паров этанола, вводимых в накопитель, максимальная температура пламени падает, но остается достаточно высокой (2600 °С). Благодаря повышению теплотворной способности этанола количество тепла, выделяемого пламенем при его наличии, возрастает втрое. Такое пламя дает наиболее остро направленный факел. При добавке этанола в продуктах сгорания присутствует угарный газ (СО).

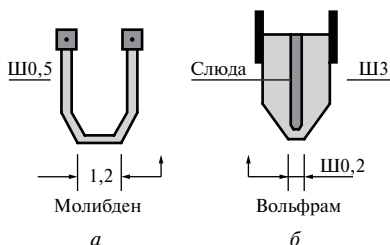


Рис. 2.14. Жало наконечника малой массы для пайки сопротивлением: а – с площадью касания $0,2 \text{ мм}^2$; б – $0,04 \text{ мм}^2$

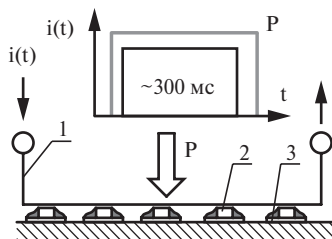


Рис. 2.15. Импульсный нагрев паек ленточным нагревателем: 1 – нагреватель; 2 – планарные выводы компонента; 3 – контактные площадки на плате

Производительность паяльной головки непрерывного действия по длине паяного шва при использовании добавок этанола достигает 10 мм/с . Расход воды 14 г/ч .

Установки для струйной локальной пайки просты в изготовлении и обслуживании. Особенно велико их преимущество перед другими в случае пайки массивных проводов или контактов с повышенной теплоемкостью либо при пайке относительно высокотемпературными припоям и при требовании кратковременности пайки из-за ограниченной жаростойкости изоляции. Например, пайку пламенем жгутов к низкочастотным разъемам производят припоем П Сr 40 при $670 \pm 20^\circ \text{C}$, пайку пламенем кабелей с фторопластовой изоляцией – припоем ПСр2,5 при $360 \pm 10^\circ \text{C}$ в течение 2 с. Пайку кабелей с полиэтиленовой или полистирольной изоляцией производят припоем ПОСК 50-18 при $200 \pm 20^\circ \text{C}$ в течение 1 с.

2.3.6.3. Пайка сопротивлением

В этом случае тепло выделяется в U-образном электроде (рис. 2.14). 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. 2.15.

Недостатки:

- неспособность пайки разнородных компонентов с одной настройки режимов;
- загрязнения электродов флюсом и окислами припоев искажают режимы пайки.

2.3.6.4. Лучевая пайка

Локальная лучевая пайка основана на нагреве с помощью некогерентного ИК-потока (рис. 2.16). При использовании в качестве источника ксеноновой газоразрядной лампы высокого давления (ДКсР-5000 М, ДКсР-3000 М, ДКсШ-1000) в фокусе достигается температура 1000...1500 °С. Наибольший интерес представляет такое конструктивное решение оптической фокусирующей системы, при котором малый диаметр локальной области в плоскости сочетается с вытянутостью вдоль оптической оси. Для этого малую апертуру эллиптического рефлектора, необходимую для удобства работы, совмещают с большой апертурой системы в целом, что позволяет получать фокальное пятно малого диаметра. Световые лучи, отраженные от рефлектора, поступают на линзу одновременно с прямым световым потоком от лампы. В результате фокальная область оказывается вытянутой вдоль оптической оси системы нагрева. Такая форма фокальной области позволяет снизить требования к точности расположения нагреваемых деталей.

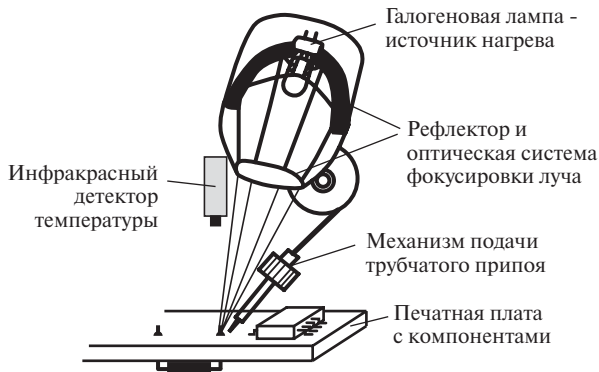


Рис. 2.16. Схема процесса лучевой пайки

Нагрев световым лучом зависит от отражающих и теплофизических свойств поверхности. Для конкретных условий технологический режим может быть стабилизирован, обеспечивается высокая повторяемость.

Одним из главных преимуществ светолучевой локальной пайки является возможность точного дозирования световой ИК-энергии по продолжительности воздействия с помощью стандартных фотозатворов. Пайка светолучевым способом требует специального оборудования (рис. 2.17), но значительно менее сложного и громоздкого, чем лазер и установки электронно-лучевой сварки. Для электронно-лучевого способа необходим вакуум, что существенно удлинит и усложняет процесс.

Диаметр фокальной области при светолучевом способе значительно больше (1...15 мм), что в ряде случаев для целей пайки является важным преимуществом.

Для лучевой пайки важна плотность мощности, развиваемая источником света, и размер зоны горения, так что чем она меньше, тем в меньшую точку можно сфокусировать пятно луча в зоне горения. В табл. 2.1 в качестве примера приведены характеристики типовых ламп, применяемых в лучевой пайке. Все они имеют кварцевый баллон с мощным отводом рассеиваемой мощности. В галогенных лампах используются металлические нити в режиме перекала. Галогенная среда позволяет испаряющемуся металлу нити вступать в соединение с галогеном и возвращаться на эту же нить за счет восстановления до металлического состояния. Без этого процесса срок службы лампы не превышал бы 100 ч. В ртутных лампах используется электродуговой разряд в ртутных парах. Поэтому процесс поджига ртутных ламп занимает определенное время.

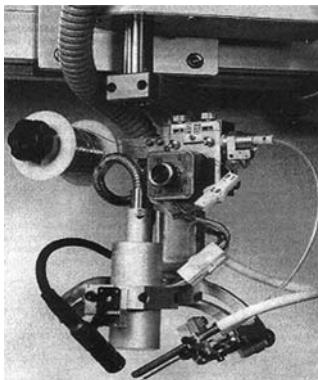


Рис. 2.17. Внешний вид установки лучевой пайки, соответствующей схеме на рис. 2.16

Таблица 2.1. Газоразрядные лампы высокого давления

Тип лампы	Плотность мощности, Вт/см ²	Размер зоны горения, мм	Время жизни, ч
Галогенная лампа	400	4	2000
Ртутная лампа	20 000	1	200

2.3.6.5. Лазерная пайка

Светолучевая пайка сегодня начинает уступать лазерной. Световое пятно, формируемое лазерным лучом, гораздо меньше светового. Монохромное излучение лазера позволяет использовать спектральную избирательность поглощения энергии (рис. 2.18). При правильном подборе лазера с коротковолновым излучением (например, эксимерные лазеры) можно сканировать монтажные поля на плате, не модулируя (не выключая) луч. Луч, проходя по ди-



Рис. 2.18. Избирательность поглощения лучевой энергии

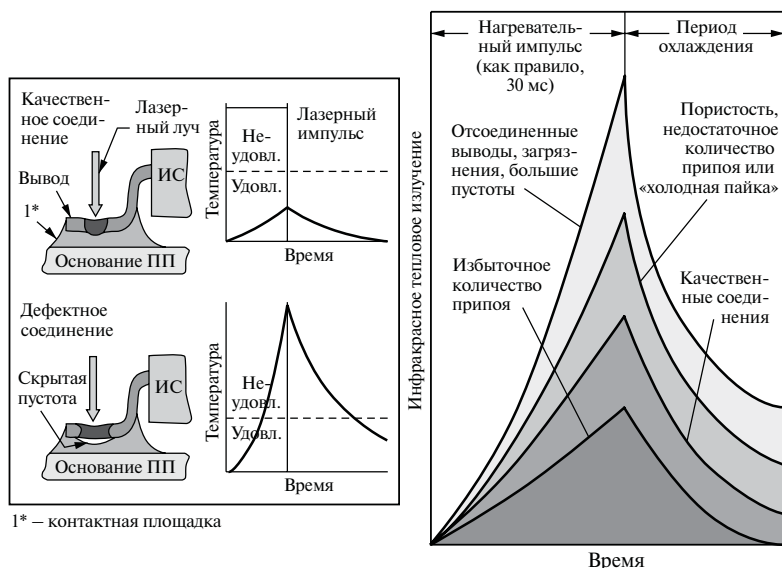


Рис. 2.19. Тестирование паяных соединений лазерным ИК-контролем

электрику, не нагревает его (не поглощается диэлектриком), но интенсивно поглощается металлом и плавит припой на выводах компонентов.

Лазерная пайка может быть совмещена с системой контроля качества паяных соединений. Система лазерного ИК-контроля может использоваться и самостоятельно для тестирования паяных соединений, полученных другими методами. В случае самостоятельного использования система лазерного ИК-контроля подает на тестируемую пайку управляемый импульс лазерного излучения для незначительного нагрева поверхности соединения. Отдельный ИК-детектор наблюдает за ростом и спадом температуры поверхности тестируемой пайки. Динамика роста и спада температуры становится «характеристикой» соединения. Система сравнивает характеристику тестируемого соединения со стандартной и сообщает степень ее отклонения от нормы. Скорость тестирования составляет 10 паяных соединений в секунду с временем воздействия 30 мс. Система ИК-контроля использует два типа лазеров. Один — для нагрева тестируемых паяк — лазер на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом, генерирующий в непрерывном режиме — 15 Вт на объекте. Другой — указательный — гелий-неоновый лазер видимого диапазона — 1 мВт на объекте. Детектор инфракрасного излучения — антимонид индия InSb с криогенным охлаждением. На рис. 2.19 показано несколько температурных характеристик, соотнесенных с некоторыми дефектами паяных соединений.

При лазерной пайке, совмещенной с ИК-контролем, непропай может быть идентифицирован по ненормальному темпу остывания места пайки, и

установка может вернуться к этой точке, чтобы повторить операцию или отметить ее для детального просмотра оператором.

Лазерная пайка, совмещенная с ИК-контролем, требует для эксплуатации хорошо обученного и ответственного персонала, чтобы достоверно идентифицировать качество объектов контроля. Ее использование оправданно для пайки и тестирования особо ответственных изделий. В условиях промышленного производства ее не применяют главным образом из-за дороговизны и сложности в работе.

2.4. Выбор методов нагрева для монтажной пайки

Желая достичь максимальной производительности процесса монтажа, производители выбирают групповые методы пайки, тогда технологический цикл пайки не превышает двух минут. При этом оплаиваются все соединения за один цикл. Однако при групповом нагреве нагреваются и компоненты, что бывает крайне нежелательно для аппаратуры с высоким уровнем надежности. Тогда используют локальную пайку, при которой нагреваются только выводы компонентов. Современные производства, формируя сборочно-монтажные линии, комплектуют их полным набором средств нагрева, встроенных в линию или выделенных из линии: печь конвекционного нагрева (или комбинированная с ИК-нагревом), установка пайки волной припоя с модулями флюсования, предварительного нагрева и собственно пайки, установка конденсационной пайки, рабочие места для ручной пайки с использованием паяльных станций, отдельная установка монтажа-демонтажа BGA-компонентов, печь для отверждения клеев.

При ограниченности средств довольствуются туннельной или камерной печью конвекционного нагрева с управляемым термопрофилем и паяльными станциями. Но для монтажа BGA-компонентов нужна отдельная специализированная станция.

2.5. Типичные дефекты пайки

2.5.1. «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 — газовыделениями 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 неизбежно 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 подслои. Тонкий слой иммерсионного олова быстро (за две недели) прорастает интерметаллами Sn_xCu_y 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 вызывать и процесс золочения. Осаждение золота из нейтральных электролитов уменьшает вероятность этих явлений.

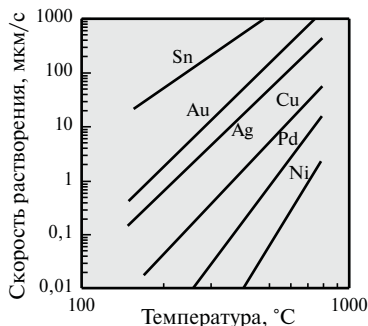
Загрязнения припоев значительно сказываются на их свойствах, о чем будет сказано в главе 3. Зачастую дорогостоящая процедура очистки ванн припоя заставляет производителей терпеть насыщение ванны загрязнениями до конца, пока не будет явно видно, что нужно остановиться и очистить припой. Но до того, как 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.

2.5.2. Растворение покрытий

Расплавленный припой активно и быстро растворяет покрытия спаиваемых элементов (рис. 2.20). В холодном состоянии этот процесс с образованием интерметаллидов тоже идет, но медленно (рис. 2.21). Все это имеет такие последствия:

- припой загрязняется примесями с соответствующими плохими последствиями (см. подробно в главе 3);
- в ряде случаев пайка отделяется от поверхности (разрушается), например, когда в ней растворяется серебро на керамической поверхности;
- растворы металлических примесей в припое образуют неплавящиеся частицы интерметаллоидов, которые плавают в объеме припоя и могут внедряться в паяные соединения, ослабляя их прочность;
- наконец, с ростом толщины интерметаллического слоя прочность паяных соединений заметно падает (рис. 2.22).



2.5.3. 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.

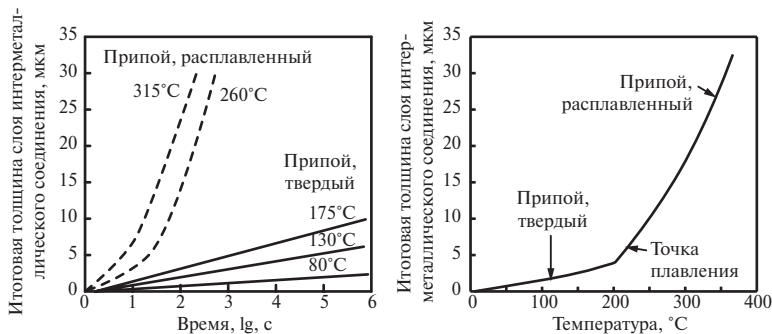


Рис. 2.21. Скорость растворения различных покрытий в расплавленном припое ПОС61

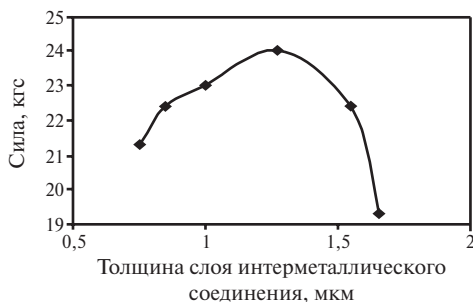


Рис. 2.22. Изменение прочности паяного соединения на отрыв с ростом слоя интерметаллоидов

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 так или иначе 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, как будет показано в главе 3. 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 яв-

ления 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 газовыделения 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 выделив-

шегося 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.

2.5.4. Растворение покрытий

В результате растворения основного металла расплавленным припоем при пайке паяное соединение может быть насыщено этими посторонними для них металлами и отдельными образованиями, которые могут содержать значительное количество частиц интерметаллических соединений, образованных этими металлами. Очень часто поверхность паяного соединения может выглядеть «песчаной» вследствие наличия на поверхности этих частиц. В случае чрезмерного растворения покрытий выводов и контактных площадок печатных плат поверхность может быть полностью разрушена для смачивания припоем. Разрушение покрытий при пайке может быть вызвано: 1) большой скоростью растворения припоем; 2) слишком тонкой металлизацией; 3) высокой активностью флюса; 4) высокой температурой пайки; 5) продолжительным временем пребывания при температуре, превышающей температуру ликвидуса припоя, при пайке.

На рис. 2.20 показано растворение металлов в припое Sn60/Pb40 [4]. Скорость растворения убывает в следующем порядке: $\text{Sn} > 5\text{Au} > \text{Ag} > \text{Cu} > \text{Pd} > \text{Ni}$. Теоретически проблема высокой скорости растворения некоторых металлов может быть уменьшена путем замены их на покрытия с меньшей скоростью растворения. Одно из решений, используемых на практике, — это использование многослойных покрытий, например иммерсионного золота поверх химически осажденного никеля. Здесь слой золота представляет собой тонкую пленку (0,1 мкм) и служит в качестве защитного слоя от окисления никеля, в то время как слой никеля имеет толщину 5...6 мкм и служит в качестве барьера между медью и припоем, предотвращая ее растворимость, и в качестве диффузионного барьера, предотвращая образование интерметаллоидов типа Sn_xCu_y . При пайке по покрытию Иммерсионное золото/Химникель тонкий слой золота полностью растворяется в припое за доли секунды, создавая возможность образования металлургических связей между припоем и свободным от оксидов никелем.

Другие химически и гальванически осажденные покрытия благородными металлами на подслое никеля могут быть более толстыми, чем иммерсионные, и за счет этого обеспечивать большую устойчивость процессов пайки.

При пайке металлизированных керамических оснований ГИС или микросборок даже незначительное растворение тонких покрытий может привести к его полному отсутствию на основании, приводя, таким образом, к отслоению паек.

Проблемы высокой скорости растворения покрытий можно решить, если заранее легировать припои металлом покрытий. Например, растворение

серебра припоем олово-свинец значительно уменьшается после добавления в припой незначительного количества серебра. Однако такой подход не может быть применен при пайке по золотому покрытию. Легирование системы олово-свинец золотом приведет к образованию слишком большого количества интерметаллического соединения AuSn_4 , припой превратится в вязкую жидкость, что послужит причиной неудовлетворительного смачивания.

Растворение металлов в расплавленном припое часто усугубляется при использовании активных флюсов. Флюсы с большей активностью быстрее удаляют оксиды металлов, таким образом, они создают условия образования более раннего непосредственного контакта между расплавленным припоем и покрытием и, следовательно, этот контакт будет более продолжительным, а значит и более разрушительным. При неизменном температурном профиле пайки большее время контакта расплавленного припоя с покрытием будет означать большую степень растворения.

Высокая температура процесса и продолжительное время пребывания при температуре, превышающей температуру ликвидуса припоя, способствуют ускорению процессов растворения покрытий. Например, скорость растворения золота припоем Sn60/Pb40 может увеличиться в 1,5 раза, когда время пребывания при температуре, превышающей температуру ликвидуса припоя, увеличивается с 60 до 90 секунд, и увеличится почти в 3 раза, когда температура пайки повышается с 205 до 235 °C.

Перечень мер, способствующих уменьшению растворения покрытий, включает в себя: 1) использование финишных покрытий с меньшей скоростью растворения; 2) легирование покрытий элементом с меньшей скоростью растворения; 3) легирование припоя металлом покрытий; 4) использование флюса с меньшей активностью; 5) предотвращение перегрева паяк.

2.5.5. Интерметаллические соединения

Когда два элемента-металла имеют ограниченную растворимость друг в друге, в их сплавах при затвердевании могут быть образованы новые фазы. Эти фазы не являются твердыми растворами и известны как промежуточные фазы, или интерметаллические соединения, или просто интерметаллиды, например, Cu_3P , Cu_3Sn и Cu_6Sn_5 — это нестехиометрические соединения, которые стабильны при переменном составе. Эти соединения имеют тенденцию к оказанию значительного влияния на свойства паяного соединения. С ростом интерметаллического соединения до толщины примерно 1,3 мкм предел прочности при сдвиге увеличивается примерно на 20%. Дальнейший рост толщины начинается сказываться на хрупкости слоя, кривая предела прочности падает ниже значения для самого припоя.

Интерметаллические соединения также приводят к плохому смачиванию поверхностей припоем. Золото — одно из наиболее часто встречающихся

металлов, используемых при металлизации поверхностей для создания паяных соединений в производстве электроники благодаря превосходной стабильности его поверхности и паяемости. Но золото как загрязнение в припое очень пагубно сказывается на пластичности вследствие образования хрупкого интерметаллического соединения Sn-Au, в основном AuSn_4 . Покрытие контактных площадок из чистого золота или его сплава толщиной не более 1,5 мкм может быть полностью растворено расплавленным припоем во время пайки волной припоя. Количество образуемого при этом AuSn_4 в объемной ванне недостаточно для ухудшения механических свойств припоя. Но для процесса поверхностного монтажа с применением паяльной пасты объемы паек гораздо меньше и образование AuSn_4 сказывается на процессе пайки и прочности паяного соединения.

Появившаяся в последнее время альтернатива золоту — иммерсионное олово с барьерным подслоем избавляет процесс пайки от образования интерметаллических соединений и улучшает процесс пайки.

2.5.6. 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. 2.23. 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 .

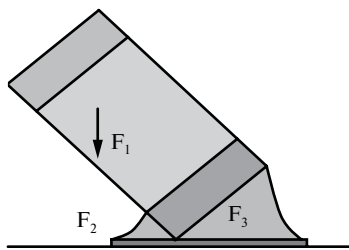


Рис. 2.23. Эффект «надгробного камня»

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 «над-

гробного 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 олово-свинец, смачивание контактных площадок произойдет практически мгновенно, как только припой расплавится. Поэтому даже при малейшей разнице температур между контактными площадками на одной из них смачивание 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 выделенности 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 выделенности;

- использовать паяльную пасту с замедленным оплавлением, например со смесью оловянного порошка или со сплавами с широким диапазоном кашецеобразного состояния.

2.5.7. Сдвиг компонента

Сдвиг или смещение компонента относительно предназначенных ему контактных площадок на печатной плате (рис. 2.24) 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», описанные в предыдущем разделе, 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.

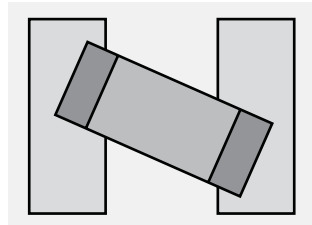


Рис. 2.24. Сдвиг компонента

Уменьшения сдвига можно достичь при следующих условиях [4].

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.

2.5.8. 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. 2.25. 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.

Использование подогрева снизу позволяет сначала нагреть плату, и паяльная паста сперва 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.

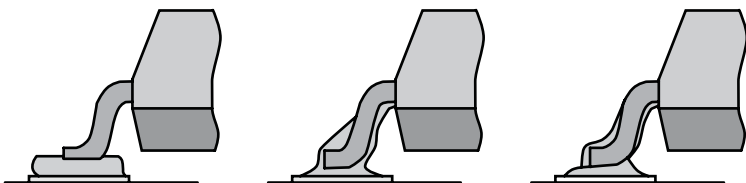


Рис. 2.25. Последовательность стадий капиллярного оттока: слева: вывод помещается в паяльную пасту; посередине: плавящаяся паяльная паста может уплыть из области соединения на вывод; справа: когда расплавленный припой перетечет на вывод, его не хватит для формирования полноценной паяной галтели

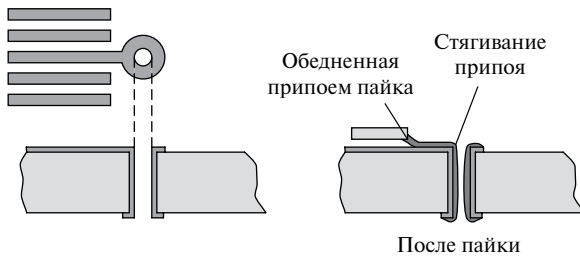


Рис. 2.26. Отток припоя с монтажной площадки в металлизированное отверстие

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. 2.26) — 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.

Методы устранения капиллярного оттока припоя можно подытожить следующим образом [4]:

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.

2.5.9. 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 [4]:

- 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.

2.5.10. Отсутствие электрического контакта

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

2.5.10.1. Эффект подушки

Эффект подушки — это расположение вывода на припое, которое выглядит как вывод, лежащий на подушке, без образования электрического контакта. Он показан на рис. 2.27 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.

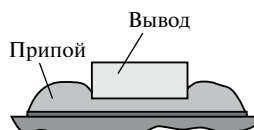


Рис. 2.27. Эффект подушки

2.5.10.2. Другие виды отсутствия электрического контакта

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 необходимо 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 ССГА на плате с застаревшим HASL-покрытием.

2.5.10.3. Отслаивание галтели

Частным случаем отсутствия электрического контакта является отслаивание галтели припоя и контактной площадки от основания печатной платы. На рис. 2.28 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.

2.5.11. 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 затвердевания. 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 обусловливается 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

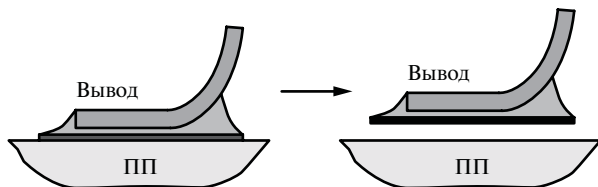


Рис. 2.28. Отслаивание галтели от основания платы

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 усугубление 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, например, до 90 минут при 50 °C для паяльной пасты с канифольным среднеактивированным флюсом с 90-ным содержанием припоя Sn62/Pb36/Ag2. 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 используется 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.

2.5.12. 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.

2.6. Заключение

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 поверхностью. 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.

Литература

1. Григорьев В. Бессвинцовая технология — требование времени или прихоть законодателей от экологии? // Электронные компоненты, 2001, № 6.
2. www.felsweb.com
3. CM310 composite laminate. ISOLA datasheet.
4. Медведев А. Конструктивно-технологическое обеспечение надежности БЦВМ. Проблемы информатизации. № 3, 1998.
5. Leiterplatten für die “bleifreie Zeit”. Dipl. Ing. L. Oberender, Andus Electronic.
6. Going Beneath the Surface of Surface Finishes, Don Cullen.
7. Proceeding of 5th European Surface Mount Conference, Brighton, 2002.
8. www.estek.ru Газоразделительное оборудование для получения газов: кислорода, азота, углекислого газа и др.
9. Alternative Surface Finishes: Failure Modes of Electroless Nickel // Immersion Gold. Brian J. Toleno, ACI, USA.
10. Future Surface Finishing needs with OSP. Frando van der Pas // Printed Circuits Europe, Nov-Dec. 1999.
11. Final Finishes. Frando van der Pas // Cookson Electronics, 5th European Surface Mount Conference, Brighton, 2002
12. J-STD-020-B. Стандарт для определения чувствительности к влаге в процессе пайки оплавлением негерметичных твердотельных компонентов для SMT-монтажа.
13. www.estek.ru Сухие шкафы для хранения SMD-компонентов.
14. Global trend of lead-free Soldering and technologies/John H. Lau and Katrina Lin. SMT China.
15. The Black Pad Failure Mechanism — From Beginning to End/Ronald A. Bultwith, Michael Trosky, Louis Picehione, Darlene Hug // Cookson Electronics Assembly Materials Group — Alpha Metals, Global SMT and Packaging Journal, Sept. 2002.
16. www.estek.ru Температурные и климатические камеры TABAI/Espec.

ГЛАВА 3

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МОНТАЖНОЙ ПАЙКИ

Бывшие отраслевые стандарты (в частности, [1]) однозначно устанавливали составы, свойства и области применения материалов для пайки. Сейчас, когда на российском рынке присутствует множество предложений материалов для пайки, приходится возвращаться к основам для того, чтобы правильно ориентироваться в их выборе.

3.1. 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 полутвердевший припой. Если твердеющий припой из неэвтектического сплава потревожить даже незначительным сдвигом (микросдвигом), мгновенно наступает общая кристаллизация с выделением крупных кристаллов с непроводными междокристаллическими 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 слоистой 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 паяк неэвтектическими сплавами значительно хуже. Сравните λ – характеристики:

- пайка эвтектическим сплавом ПОС-61 10^{-13} ч^{-1} ;
- пайка неэвтектическим сплавом ПОС-40 10^{-8} ч^{-1} .

Наилучшим образом зарекомендовал себя для монтажной пайки эвтектический 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.

3.1.1. Диаграмма сплавов олово-свинец

Возможные фазы ряда сплавов олово-свинец и их соотношения показывает диаграмма состояния на рис. 3.1. 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

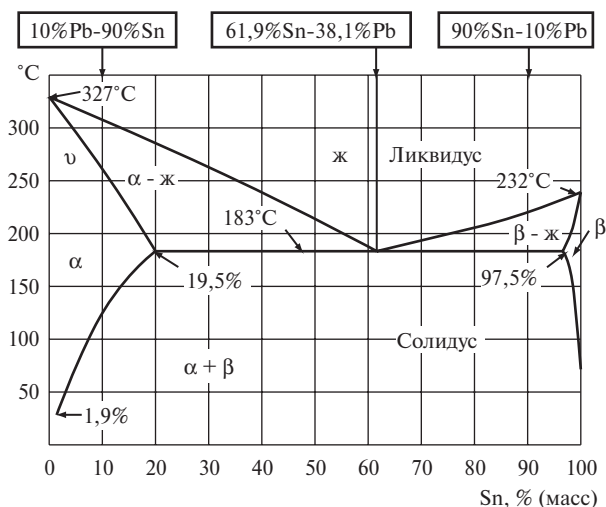


Рис. 3.1. Диаграмма сплавов олово-свинец

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 °C 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 °C 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 °C до 1,9% при 20 °C.

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 °C) 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 улетучивается, чем свинец, и сплав постепенно пе-

рестает 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.

3.1.2. Примеры других мягких припоев

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

Индиевые припой 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 припой 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.

3.1.3. Загрязнения припоев

Растворенные в припоях примеси существенно ухудшают их свойства, и потому требуется своевременная очистка или замена отработавшего припоя на свежий. Примеры влияния загрязнений на свойства припоя:

- усиливают окисление припоя примеси алюминия, цинка, кадмия;
- снижают смачиваемость примеси сурьмы, алюминия, цинка, кадмия, меди;
- образуют интерметаллиды в виде посторонних включений, снижающих механическую прочность и пластичность, примеси золота, меди, железа;
- ускоряют процесс перехода олова в аморфное состояние («оловянная чума») примеси алюминия и цинка.

Более подробно влияние примесей и загрязнений припоя см. в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Влияние примесей на характеристики припоя

Элемент	Химическое обозначение	Содержание, %	Возможное влияние на характеристики припоя
Алюминий	Al	0,002%	Изменяет окислительную способность припоя, образует оксидную пленку, формирует окалину
Сурьма	Sb	0,500%	Сурьма – один из элементов, который практически не вносит изменения в свойства сплава в количестве до 0,5%
Мышьяк	As	0,020%	Мышьяк в количестве более 0,02% приводит к ухудшению смачивания и уменьшению прочности узла пайки
Свинец	Pb	–	Допустимо изменение содержания свинца в пределах $\pm 1\%$
Кадмий	Cd	0,002%	Изменяет окислительную способность, приводит к появлению окалины
Железо	Fe	0,010%	Приводит к появлению нерастворимых соединений в сплаве, ухудшает характеристики сплава
Золото	Au	0,050%	Золото приводит к увеличению вязкости расплава, узлы пайки получают матовыми
Индий	In	0,500%	Не известно ухудшения свойств при содержании менее 0,5%
Медь	Cu	0,300%	Медь повышает вязкость расплава. Может привести к усадке и формированию перемычек, а также увеличению поверхности узла пайки
Никель	Ni	0,010%	При содержании выше установленного лимита не наблюдается влияния на паяльные свойства сплава
Палладий	Pd	0,002%	Приводит к образованию окалины
Фосфор	P	0,010%	Фосфор добавляют для восстановления окисленного сплава, при содержании более 0,01% он может привести к ухудшению смачиваемости

Таблица 3.1. Окончание

Элемент	Химическое обозначение	Содержание, %	Возможное влияние на характеристики припоя
Сера	S	0,001%	Сера приводит к ухудшению смачиваемости и появлению пористости на поверхности соединения
Серебро	Ag	0,100%	Серебро приводит к образованию окалины и образованию пористости на поверхности соединения
Висмут	Bi	—	При содержании 2–3% не наблюдается негативного влияния на паяльные свойства сплава. При содержании от 2% узлы пайки выглядят матовыми
Цинк	Zn	0,002%	Влияние цинка похоже на действие алюминия и кадмия. Он нарушает текучесть и адгезию. Увеличивает появление окалины, приводит к формированию твердой оксидной пленки и перемычек
Олово	Sn	—	Изменения в диапазоне от 0,5 до 1,0% могут привести к дефектам пайки

В табл. 3.2 даны требования стандарта QQ-S-571E к сплавам оловянно-свинцовых припоев, определяющие основной состав и максимально допустимое содержание примесей [2]

Таблица 3.2. Требования стандарта QQ-S-571E к сплавам оловянно-свинцовых припоев

Элемент	Sn63/Pb37	Sn62/Pb38	Sn60/Pb40
Sn	62,5...63,5	61,5...62,5	59,5...61,5
Pb	Остальная часть	Остальная часть	Остальная часть
Sb	0,20...0,50	0,20...0,50	0,20...0,50
Bi	0,25	0,25	0,25
Ag	нет данных	1,75...2,25	нет данных
Cu	0,08	0,08	0,08
Fe	0,02	0,02	0,02
Zn	0,005	0,005	0,005
Al	0,005	0,005	0,005
As	0,03	0,03	0,03
Прочие	0,08	0,08	0,08

3.1.4. Составы припоев

Составы припоев можно найти в справочниках, стандартах и каталогах фирм-поставщиков. В табл. 3.3 показаны в качестве примера несколько типов припоя на основе сплавов олово-свинец.

Таблица 3.3. Монтажные легкоплавкие припой

Марка припоя	Состав припоя, %	Паяемый металл (металлическое покрытие)	Температура плавления, °С		Область применения
			Солидус	Ликвидус	
ПОС-40	Олово – 39...41, свинец – 61...59	Медь, никель и их сплавы, товар, серебро, золото, олово и его сплавы, кадмий	183	238	Пайка и лужение деталей и монтажных проводов, жгутов, наконечников, проходных стеклянных изоляторов
ПОС-61	Олово – 60...62, свинец – 40...38	Медь, никель и их сплавы, товар, серебро, золото, олово и его сплавы, кадмий	183	192	Пайка и лужение выводов и ПП, микропроводов, пленочных покрытий, работающих при температуре не выше 100 °С
ПОСК 50-18	Олово – 49...51, кадмий – 17...19, свинец – остальное	То же, что и ПОС-61	142	145	Пайка и лужение печатных узлов, керамических изоляторов, конденсаторов, проводов и т. д., не допускающих нагрев выше 180 °С
ПОССу 61-0,5	Олово – 60...62; сурьма – 0,2...0,5; свинец – остальное	Медь, никель и их сплавы, товар, серебро, золото, олово и его сплавы, кадмий	183	189	Пайка, лужение выводов, элементов печатных плат, узлов и блоков, электрического монтажа, работающих при температуре не выше 100 °С. Групповая пайка оплавление припойных паст
ПСр 2,5	Олово – 5...6; серебро – 2,2...2,8; свинец – остальное	Медь, никель и их сплавы	295	305	Пайка, лужение моточных изделий, штепсельных разъемов, работающих при температуре от 150 до 250 °С
ПСр 2	Олово – 29...31; кадмий – 4,5...5,5; серебро – 1,7...2,3; свинец – остальное	Медь, никель и их сплавы	225	235	
ПСрОС 3-58	Олово – 57,7...57,8; сурьма – 0,2...0,8; серебро – 2,8...3,4; свинец – остальное	Медь, никель и их сплавы	183	190	Пайка, лужение керамики в производстве микро-модулей, конденсаторов, проходных изоляторов

Таблица 3.3. Окончание

Марка припоя	Состав припоя, %	Паяемый металл (металлическое покрытие)	Температура плавления, °С		Область применения
			Солидус	Ликвидус	
ПОСВ 33	Олово — 32,4...34,4; свинец — 32,3...34,4; висмут — 32,8...34,3	Медь, пайка металлизации по неметаллам серебром, оловом-свинцом, оловом-висмутом	120	130	Пайка коаксиальных кабелей
Сплав Розе	Олово — 17,5...18,5; свинец — 31,5...32,5; висмут — 49,5...50,5		93	96	Лужение элементов печатных плат
Сплав Вуда	Олово — 12...13; свинец — 24,5...25,5; кадмий — 12...13; висмут — 49...51		66	70	Пайка вставок плавких термопредохранителей
ПСрОСин 3-56	Олово — 55,3...57,3; серебро — 2,6...3,4; индий — 2,8...3,2; свинец — остальное	Золото, серебро, металлизация золотом, серебром	175	175	Пайка, лужение деталей аппаратуры в микроминиатюрном исполнении
ПСр 3И	Серебро — 2,5...3,5; индий — 96,5...97,5		141	141	
ПОИ 50	Олово — 49...51; индий — остальное		117	117	Пайка, лужение изделий из феррита и керамики с применением ультразвука
ИН 2	Индий — 99,75		156	156	Пайка полупроводниковых диодов СВЧ
ПОСВ ИЗ6-4	Свинец — 36; висмут — 4, олово — остальное	Медь, покрытие серебром, оловом-свинцом, оловом-висмутом	168	168	Лужение элементов печатных плат
П200Г	Германий — 0,5...1,0, цинк — 9...10, олово — остальное	Алюминий и его сплавы	200	200	Пайка, лужение с применением ультразвука деталей и узлов настроечных элементов, работающих при температуре до 250 °С

3.2. Припои для бессвинцовой пайки

3.2.1. Существо бессвинцовой пайки

Решение экологических проблем при утилизации электронной аппаратуры потребовало изъятия из обращения припоев, содержащих свинец [3, 4]. 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 выбор достаточно широкий. В настоящее время (2006 г.) 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%.

3.2.2. Бессвинцовые припои

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°C), с температурой плавления, равной эвтектике $Sn63/Pb37$ (180...200°C), со средней температурой плавления (200...230°C) и высокотемпературные (230...350°C). Основные типы бессвинцовых припоев приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Составы бессвинцовых припоев

Тип	Состав (по массе), %	Температура плавления, °С
Низкотемпературные бессвинцовые припой		
Sn/Bi (Олово/Висмут)	Sn42/Bi58	135...140 (эвтектика)
Sn/In (Олово/Индий)	Sn48/In52	115...120 (эвтектика)
Bi/In (Висмут/Индий)	Bi67/In33	107...112
Низкотемпературные бессвинцовые припой для замены эвтектики Sn/Pb		
Sn/Zn (Олово/Цинк)	Sn91/In9	195...200
Sn/Bi/Zn (Олово/Висмут/Цинк)	Sn89/Zn8/Bi3	189...199
Sn/Bi/In (Олово/Висмут/Индий)	Sn70/Bi20/In10	183...193
Среднетемпературные бессвинцовые припой		
Sn/Ag (Олово/Серебро)	Sn96,5/Ag3,5	221 (эвтектика)
Sn/Ag (Олово/Серебро)	Sn98/Ag2	221...225
Sn/Cu (Олово/Медь)	Sn99,3/Cu0,7	227 (эвтектика)
Sn/Ag/Bi (Олово/Серебро/Висмут)	Sn93,5/Ag3,5/Bi3	206...213
Sn/Ag/Bi (Олово/Серебро/Висмут)	Sn90,5/Ag2/Bi7,5	207...212
Sn/Ag/Cu (Олово/Серебро/Медь)	Sn95,5/Ag3,8/Cu0,7	217 (эвтектика)
Sn/Ag/Cu/Sb (Олово/Серебро/Медь/Сурьма)	Sn96,7/Ag2/Cu0,8/Sb0,5	216...222
Высокотемпературные бессвинцовые припой		
Sn/Sb (Олово/Сурьма)	Sn95/Sb5	232...240
Sn/Au (Олово/Золото)	Au80/Sn20	280

Низкотемпературные припой 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, серебра, 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°С. В меньшем температурном диапазоне практически отсутствуют бессвинцовые припой 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 $\text{Sn}96,5/\text{Ag}3,5$ с температурой плавления 221°C при испытаниях на термостатирование показал более высокую надежность по сравнению с Sn/Cu . Припой $\text{Sn}96,5/\text{Ag}3,5$ многие годы применяется в Японии для монтажа массовой продукции.

Эвтектический припой $\text{Sn}95,5/\text{Ag}3,8/\text{Cu}0,7$ 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 . Точный состав этого припоя по-прежнему остается предметом для обсуждения. Sn/Ag/Cu может быть использован для получения как универсальных, так и высокотемпературных припоев.

Припой $\text{Sn}93,5/\text{Ag}3,5/\text{Bi}3$ 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 $\text{Sn}89/\text{Zn}8/\text{Bi}3$ 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 сложилось единое мнение, что наилучшей альтернативой для замены эвтектики $\text{Sn}62/\text{Pb}38$ в аппаратуре общего назначения является сплав $\text{Sn}95,5/\text{Ag}3,8/\text{Cu}0,7$ с температурой плавления 217°C , что на 34°C выше $\text{Sn}62/\text{Pb}38$. 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°C . Таким образом, если для сплава $\text{Sn}62/\text{Pb}38$ с температурой плавления 183°C рабочая температура устанавливается равной $220\ldots 230^\circ\text{C}$, то для $\text{Sn}95,5/\text{Ag}3,8/\text{Cu}0,7$ — 270°C . Это значительное изменение режима пайки может привести к серьезным проблемам при монтаже аппаратуры, кардинальным изменениям в используемых материалах и технологических процессах.

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 $Sn/Ag/Cu$.

3.2.3. Финишные покрытия для бессвинцовой пайки

В производстве печатных плат использование бессвинцовых финишных покрытий под пайку не вызывают затруднений. Промышленность в течение многих лет уже применяет сплавы типа $Ni/ImmAu$, Ni/Pd , $ImmSn$, $ImmAg$, $ImmPd$, имидазол ($C_3H_4N_2$) — органическое защитное покрытие, выполняющее роль ингибитора для меди. Проведенные исследования показали, что смачиваемость четырех из пяти бессвинцовых покрытий (имидазол, горячий Sn , Ni/Pd и $ImmPd$) хуже в пайке по сравнению с эвтектикой Sn/Pb . Наиболее перспективным покрытием для пайки меди бессвинцовыми припоями признан имидазол. Но он способен срабатывать только при одноразовой пайке. Покрытия Sn , Pd и Au обеспечивают хорошую смачиваемость практически для всех припоев, однако плохо работают с припоем $Sn58/Bi$.

3.2.4. 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 технологического процесса. 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 [5]. 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. Исключение составляют некоторые типы интегральных схем, конденсаторов и соединителей, предельная температура пайки для которых не должна превышать 225...230°C. Во всяком случае, необходимо соблюдать предписанные режимы хранения и использования компонентов [6].

3.3. Флюсы для монтажной пайки

3.3.1. 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.

3.3.2. Составы флюсов

3.3.2.1. 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 °С. При сильном нагреве (более 270 °С) происходит интенсивное разложение канифоли и потеря ее флюсующих 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 смолосодержащих 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 табл. 3.5 показаны в качестве примера несколько типов флюсов, разрешенных к применению отраслевыми стандартами [1].

Таблица 3.5. Марки флюсов, их состав и назначение

Марка флюса	Составляющие флюса и их содержание, %	Температурный интервал флюсующей активности, °С	Паяемый металл или металлическое покрытие	Применяемые припои	Область применения
Кани-фоль	Сосновая канифоль марок А, В 100%	210...300	Медь, серебро, олово, цинк, олово-свинец, золото, олово-висмут	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-кадмиевые, серебряные	Пайка и лужение деталей и проводников в изделиях специального назначения

Таблица 3.5. Продолжение

Марка флюса	Составляющие флюса и их содержание, %	Температурный интервал флюсующей активности, °С	Паяемый металл или металлическое покрытие	Применяемые припои	Область применения
ФКСп ФКЭт	Сосновая канифоль – 10...60, этиловый спирт – 90...40	200...300	Медь, серебро, олово, цинк, олово-свинец, золото, олово-висмут	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-кадмиевые, серебряные	Консервация в условиях складского хранения
ФКТ	Сосновая канифоль – 10...40, тетрабромиддипсигтен – 0,05...0,1, этиловый спирт – 90...60	200...300	Медь, серебро, олово, кадмий, цинк, олово-свинец, олово-висмут, золота	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-висмутные	Пайка и лужение контактных соединений и поверхностей в изделиях специального назначения
ФКТС	Сосновая канифоль – 15...30, салициловая кислота – 3...3,5, триэтанолламин – 1...1,5, этиловый спирт – 81...65	140...300	То же, что и ФКТ, кроме золота	То же, что и ФКТ, кроме серебряных	То же, но при условии полного удаления остатков флюса после пайки
ЛТИ-120	Сосновая канифоль – 20...25, солянокислый диэтиламин – 3...5, триэтанолламин – 1...2, этиловый спирт – 76...68	160...350	Сталь, медь, никель и его сплавы, олово, серебро, кадмий, цинк, олово-свинец, олово-висмут	Оловянно-свинцовые, серебряные	Пайка и лужение деталей и проводников в изделиях широкого потребления
ФГСп	Солянокислый гидрозин – 2...4, этиленгликоль – 25...50, этиловый спирт – 73...46	165...350	Медь и ее сплавы, никель и его сплавы, олово, серебро, кадмий, цинк, олово-свинец, олово-висмут	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-висмутные, оловянно-свинцово-кадмиевые	Пайка и лужение деталей в изделиях широкого потребления. Предварительное лужение выводов в изделиях специального назначения
ФТС	Салициловая кислота – 4...1,5; триэтанолламин – 1...1,5; этиловый спирт – 95...94	140...300	Медь, олово, серебро, кадмий, цинк, олово-свинец, олово-висмут	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-висмутные	Пайка и лужение контактных соединений и поверхностей в изделиях широкого потребления

Таблица 3.5. Окончание

Марка флюса	Составляющие флюса и их содержание, %	Температурный интервал флюсующей активности, °С	Паяемый металл или металлическое покрытие	Применяемые припой	Область применения
ФДГл	Солянокислый диэтиламин — 4...6, глицерин — 96...94	185...350	То же, что и ФТС	Оловянно-свинцовые	То же, а также групповая пайка деталей и оплавление после гальванического лужения
ФЦА	Хлористый цинк — 4...5,5; хлористый аммоний — 9,0; вода — 45, 5	180...320	Сталь, медь и их сплавы, никель и его сплавы	Оловянно-свинцовые, серебряные	Предварительное лужение поверхностей при условии полного удаления остатков флюса после пайки
ЖЗ-1-АП	Цилиндровое масло 52 — 79...81, кремнийорганическое связующее ПФМС-6 — 16...17; олеиновая кислота — 4,9...1,8; антиоксидант НГ-2246 — 0,1...0,2	200...250		Оловянно-свинцовые	Защита зеркала расплавленного припоя от окисления в механизированных установках для пайки

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.

3.3.2.2. 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 [7].

3.3.3. Типы флюсов

Предлагаемые на рынке 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. Судя по рекламе и в соответствии с рекомендациями ОСТ 4Г0.033.200, 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. По рекламе 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 преподносится рекламой как не требующий 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,

нержавеющих сталей и материалов типа сплава *ковар*. Флюсы типа *SRA* очень агрессивны и требуют тщательной отмывки при любых обстоятельствах, поэтому их использование в электронике строго регламентировано.

Tun «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.

3.3.4. Активаторы

Устойчивость процесса пайки обеспечивается активаторами — компонентами флюсов. Наиболее широко используемые активаторы включают в себя линейные дикарбоновые кислоты (щавелевая, малоновая, янтарная, глутаровая, адипиновая, пимелиновая, пробковая, азелаиновая, себациновая), особые карбоновые кислоты (лимонная, фумаровая, винная, глутаминовая, яблочная, фталевая, левулиновая, стеариновая, бензойная и органические галоидные соли (гидрохлорид диметиламина, гидрохлорид диэтиламина, гидробромид диэтиламина, гидрохлорид анилина, гидробромид пиридина, гидрохлорид пиридина, гидрохлорид этаноламина, гидрохлорид диэтаноламина, гидрохлорид триэтаноламина).

Линейные дикарбоновые кислоты более эффективны, чем монокарбоновые кислоты, и являются наиболее эффективными при относительно малой молекулярной массе. Активаторы с большей растворимостью в воде, такие как глутаровая и лимонная кислоты, как правило, являются более подходящими для водосмываемых флюсов, в то время как активаторы с низкой растворимостью, например адипиновая кислота, лучше для безотмывочных флюсов.

Галоидные соли более активны, чем органические кислоты. Однако они также более химически активны при температуре окружающей среды, поэтому необходимо более строго соблюдать срок годности особенно после вскрытия упаковки паяльной пасты.

Помимо использования органических кислот или галогенидов в качестве активаторов также часто применяются такие органические основания, как амины. Поставщиками паяльных паст практикуется использование комбинации нескольких или всех этих групп активаторов, чтобы повысить эффективность пайки.

3.3.5. Растворители во флюсах и пастах

Чтобы придать флюсам и паяльным пастам определенную вязкость, в них вводят растворители, в частности алифатические амины, гликоли, алифатические кетоны, пирролы, сложные алифатические эфиры, сложные эфиры гликолей, спирты (изопропанол, *n*-бутанол, изобутанол, этанол, терпинеол), алифатические и ароматические углеводороды, терпены (скипидар), эфиры гликолей. Среди них системы на основе гликолей являются наиболее распространенными главным образом благодаря сбалансированной растворяющей способности, содействию пайке и вязкости. Также широко используются спирты, особенно терпинеол, хорошо растворяющий канифоль. Выбор растворителя для флюса в основном определяется химическим составом флюса. Например, для водосмываемого активатора, такого как лимонная кислота, часто необходимо применение полярных растворителей, например гликоли, для того чтобы растворить активатор. Другие факторы, обуславливающие выбор растворителя, включают в себя запах и время, в течение которого паста сохраняет свои свойства на трафарете и будучи нанесенной на печатную плату.

3.3.6. Реологические добавки

Для высокопроизводительных процессов, например при трафаретной печати, требуется, чтобы паста легко протекала через перфорации трафарета, но не растекалась, будучи нанесенной на плату. Кроме того, нужно, чтобы паста была неклеякой, чтобы не задерживаться в перфорациях трафарета, но достаточно клейкой, чтобы приклеиться к плате и фиксировать компоненты, устанавливаемые на пасту после ее нанесения. Для того чтобы удовлетворять этим противоречивым требованиям, используют реологические добавки (большинство из них запатентованы) такие, как производные касторового масла, парафины (петролатум), полиэтиленгликоли (растворимые в воде), растительный воск, неорганические тиксотропные добавки (активированные силикатные порошки, активированная глина). Наиболее часто используемые реологические добавки — производные касторового масла. По своей природе это семейство химических соединений относится к углеводородам и обычно применяется в безотмывочных или канифольных среднеактивированных флюсах. Для водосмываемых флюсов преобладающим выбором являются полиэтиленгликоли или производные полиэтиленгликолей благодаря их хорошей растворимости в воде.

3.3.7. Остатки флюсов

Роль остатков активаторов в увеличении поверхностной проводимости в условиях повышенной влажности несомненна. Сомнительна только роль остатков канифоли. При каких условиях они могут создать проводимость?

Почему и при каких условиях зарубежные руководства и российские стандарты разрешают их остатки на поверхности монтажных узлов?

Чтобы ответить на эти вопросы, нужно учесть лишь то обстоятельство, что одно из назначений флюсов — растворение поверхностных окислов и загрязнений. 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.

Когда в качестве активаторов используют органические кислоты, возникает определенная опасность того, что оставшиеся на поверхности плат не до конца отмытые их остатки при взаимодействии с влагой могут ионизироваться. Это приводит к ухудшению электроизоляционных свойств и даже к электрохимическим процессам отказа изоляции.

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 спиртовые 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 (тем более активаторов), продуктов ее гидролиза и другие загрязнения в условиях увлажнения приводят к осмотическим явлениям, завершающимся

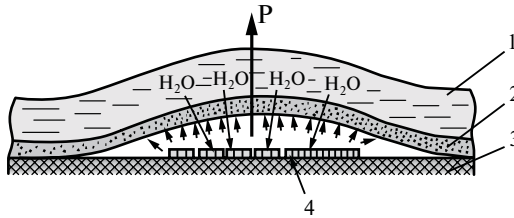


Рис. 3.2. Осмос. Растворы загрязнений под пленкой лака создают осмотическое давление, заставляющее лак отслаиваться

отслоением и пузырением лакового покрытия. Пузыри оказываются наполненными влагой и создают канал проводимости изоляции (рис. 3.2).

3.3.8. Применение флюсов

Флюсы характеризуются также минимальной температурой активации, при которой они еще эффективно работают в процессах пайки. Верхний температурный предел ограничен температурой разложения и потерей флюсующих свойств. То есть все флюсы имеют вполне определенный температурный интервал флюсующей активности. Например, спиртовой раствор канифоли (флюс ФКСп) начинает работать при температуре 200 °С и начинает разлагаться при 300 °С. Минимальную рабочую температуру имеет флюс ФКТС – 130 °С. С ним можно паять сплавом Розе. Таким образом, рабочие температуры пайки определяются не только металлургическими свойствами припоев, но и температурной активностью флюсов. Составы флюсов и припоев были стандартизованы.

Режим пайки волной припоя при переходе от *Sn/Pb* к бессвинцовым припоям изменился незначительно. В таких системах могут быть использованы прежние флюсы. При бессвинцовой пайке волной более предпочтительны водорастворимые флюсы.

Температура бессвинцовой пайки несколько выше (примерно на 30 °С), что следует учитывать при выборе флюса. Для высокотемпературных припоев используются флюсы исключительно на основе канифоли.

Вводимый в припойную пасту флюс играет ту же роль, что и при пайке компактным припоем. Поэтому в пасту вводят те же флюсы, которые используются и при обычной пайке. Отличие паст состоит лишь в том, что кроме флюса в них вводят специальные добавки, стабилизирующие процессы хранения, нанесения и пайки.

3.3.9. 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 $25 \times 25 \times 1$ мм помещают пластинку испытуемого припоя толщиной 0,3 мм и диаметром 8 мм, смачивают испытуемым 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 на плаву 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 испытуемым припоем. Отрихтованный кусок проволоки укладывают на плоский образец и проделывают 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.

3.4. Паяльные пасты

3.4.1. Требования к паяльным пастам

Паяльные пасты представляют собой однородную смесь мелкогранулированного припоя с флюсом и гелеобразующими веществами. Паяльные пасты применяют для пайки компонентов с использованием групповых методов нагрева: инфракрасным, конвекционным, конденсационным. Ее наносят на поверхность монтажных элементов методами трафаретной печати или дозаторами.

При выборе паяльной пасты учитывают следующие их свойства [8, 9]:

- склонность к комкованию — не должно происходить разбрызгивание отдельных нерасплавленных частиц припоя в процессе пайки;
- хорошая смачиваемость — расплавленный припой должен обладать способностью к капиллярному подъему и растеканию;
- отсутствие окисления мелких частиц припоя;
- возможность отмытки места пайки от флюса, входящего в состав пасты;

- однородность состава по всему объему тары — склонность к расслоению пасты за счет большей плотности припоя должна быть минимальной в течение определенного срока хранения при определенных условиях;
- приемлемые тиксотропные свойства — хорошая формоустойчивость порций пасты, нанесенных на монтажные элементы плат;
- хорошая клейкость, обеспечивающая фиксацию компонентов на плате до ее оплавления и образования паянной галтели;
- способность к хранению, обеспечивающая стабильность первоначальных характеристик в течение определенного времени;
- стабильность технологических свойств паст в разных партиях поставки.

Характеристики качества паяльных паст проявляются на различных этапах производства, как показано в табл. 3.6 [9].

Таблица 3.6. Контролируемые характеристики паяльных паст

Этапы техпроцесса	Контролируемые характеристики
Хранение	Стабильность свойств (вязкость, паяемость и т.д.)
Печать	• Тонкая печать с шагом 0,5 мм и сверхтонкая с шагом 0,4 мм • Время жизни после нанесения • Растекаемость пасты • Отделяемость шаблона • Скорость печати (нормальная 20–40 мм/с, скоростная 200 мм/с) • Тиксотропный индекс (изменение вязкости) • Заполнение перфораций в трафаретной форме • Размазываемость пасты по шаблону
Монтаж	• Время сохранения липкости • Клейкость • Стойкость пасты к осадке (растеканию)
Пайка оплавлением	• Образование перемычек (короткие замыкания) • Наличие частиц припоя в остатках флюса • Наличие окисленных частиц припоя в остатках флюса • Отрыв чип-компонентов (tombstoning) • Смачиваемость
Контроль качества	• Визуальный контроль чистоты (на остаток флюса) • Контролепригодность
Чистота отмытки (отмывочные пасты)	• Визуальный контроль чистоты (на остаток флюса) • Ионное загрязнение

3.4.2. Составы паяльных паст

Состав основных компонентов паст: припоя и флюса — полностью соответствует стандартным составам припоев и флюсов. Как было сказано выше, для придания нужных реологических свойств в пасту вводят специальные вяжущие добавки (тиксотропные агенты, загустители), а для обеспечения нужной вязкости вводят растворители. Сочетание всех компонентов паст должно га-

рантировать четкость печати, паяемость, смачиваемость, клейкость. При производстве паяльной пасты сначала отдельно изготавливаются флюс и порошкообразный припой. Затем оба компонента смешиваются друг с другом для образования паяльной пасты. В зависимости от плотности монтажа в состав паяльной пасты может быть введен тот или иной тонкости гранулянт припоя, представленный в табл. 3.7 для эвтектического оловянно-свинцового припоя. Для других сплавов плотность припоя и, следовательно, объемная доля припоя в паяльной пасте будут другими. Согласно практическому правилу размер частиц припоя не должен превышать $1/7$ размера отверстия в трафарете при нанесении пасты через трафарет или $1/10$ внутреннего диаметра иглы при нанесении дозатором. Качество нанесения пасты сильно зависит от объемной доли припоя, поэтому содержание припоя в пасте должно быть строго выверено.

Таблица 3.7. Тонкость гранулянта припоя в паяльных пастах для различных применений

Размер частиц припоя	Металлическая составляющая пасты, %	Области применения
Тип 2	88...90	Трафаретная печать, минимальный шаг выводов компонентов 1,27 мм
Тип 3	85...88	Дозирование, минимальный шаг выводов компонентов 0,5 мм (возможно 0,4 мм)
Тип 3	88...91	Трафаретная печать, минимальный шаг выводов компонентов 0,5 мм (возможно 0,4 мм)
Тип 4 или 5	85...88	Дозирование, минимальный шаг выводов компонентов 0,4 мм (возможно 0,3 мм)
Тип 4 или 5	88...91	Трафаретная печать, минимальный шаг выводов компонентов — 0,4 мм (возможно 0,3 мм)
Тип 5 или 6	89...91	Трафаретная печать, создание шариковых выводов на кристалле микросхемы с использованием паяльной пасты

На рис. 3.3 показана связь между процентным содержанием металла по весу и по объему для паяльной пасты с припоем Sn63/Pb37 (удельный вес

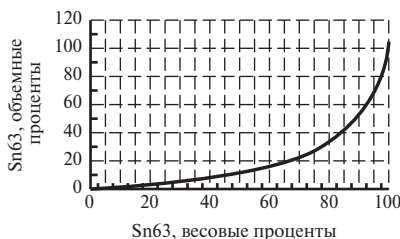


Рис. 3.3. Соотношение объемного и весового содержания гранулянта припоя в пасте

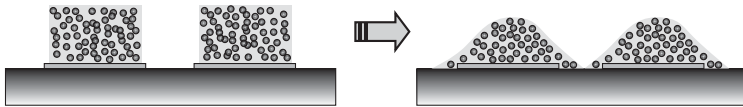


Рис. 3.4. К понятию тиксотропности: слева направо — ухудшение тиксотропности Sn63/Pb37 — 8,40, флюса — 1,00). Объемная доля припоя значительно скаывается на вязкости, тиксотропности, клейкости, дефектности отпечатков при трафаретной печати и образовании шариков припоя.

Увеличение доли припоя в пасте приводит к росту ее вязкости. Размер частиц припоя должен быть по крайней мере в семь раз меньше перфораций трафарета печати. Однако при снижении размера частиц возрастает вязкость паст.

Вязкость паяльных паст общего назначения находится в пределах 1000...2000 Пс (пуаз). Вязкость паяльной пасты скаывается, в частности, на ее растекаемости.

Присадки, вводимые в пасту для придания ей определенной тиксотропности, обеспечивают устойчивость форм выдавленных порций пасты на контактных площадках, подлежащих пайке (рис. 3.4). Как правило, для этого используются воски. Они также снижают абразивный износ трафаретов.

Для управления вязкостью пасты в нее вводят высококипящие растворители с температурой кипения 220...290 °С. Время жизни паяльной пасты в основном связано с испарением растворителя, из-за чего изменяется вязкость пасты. Она начинает прилипать к ракелю и шаблону, забивать перфорации шаблона.

Клейкость — способность пасты удерживать компоненты, даже если они находятся на нижней стороне платы. Особенно важно, чтобы компонент удерживался на месте при переходе пасты в расплавленное состояние за счет сил поверхностного натяжения. На время сохранения клейкости в основном влияют растворители. В связи с этим в пастах могут использоваться комбинация из большого разнообразия (до 20) растворителей.

Компоненты паяльных паст и их влияние на свойства показаны в табл. 3.8.

Таблица 3.8. Влияние компонентов на свойства паяльных паст

Компоненты пасты	Состав компонентов	Влияют на...	Характеристики
Припой	Свинцовсодержащие эвтектические и бес-свинцовые припои	— Температуру пайки; — смачиваемость припоем; — капиллярное растекание в зазорах пайки; — прочность паяных соединений	Расплавляясь при рабочих температурах пайки припои смачивают спаиваемые поверхности, вытесняя флюс, и при остывании образуют механическое и электрическое соединения выводов компонентов с монтажными элементами платы

Таблица 3.8. Окончание

Компоненты пасты	Состав компонентов	Влияют на...	Характеристики
Канифоли	– Древесная канифоль; – химически обработанная натуральная канифоль; – гидрированная канифоль; – полимеризующаяся канифоль; – синтетическая канифоль; – денатурированная фенолом канифоль; – денатурированная эфиром канифоль	– Четкость печати; – печать; – паяемость; – клейкость; – текучесть; – цвет остатков флюса; – контролепригодность	Размягчаясь при нагреве (температура плавления 140 °С), канифоли покрывают поверхности выводов компонентов и контактных площадок, снижают поверхностное натяжение припоя и повышают смачиваемость паяемых поверхностей. Для обеспечения оптимальных свойств обычно смешивают 2–3 канифоли
Активаторы	– Органические кислоты; – амилхлоргидрат	– Активирующая способность (паяемость): активация поверхности выводов компонентов и контактных площадок; – надежность паяных соединений и изоляции (электромиграция, коррозия); – срок хранения	Используются для удаления окисных пленок с поверхности частиц припоя, выводов компонентов и контактных площадок. Непосредственно влияют на уровень электрических свойств и надежность спаянных соединений
Тиксотропные агенты	– Воск; – гидрированное касторовое масло; – алифатический амид	– Четкость печати; – вязкость; – тиксотропный индекс; – стойкость к осадке (растекаемость); – клейкость; – запах; – отмываемость;	Тиксотропные агенты определяют качество и плотность печати, вязкость и растекаемость пасты при нанесении и нагреве, а также отделяемость шаблона при снятии
Растворители	– Этиленгликоль; – полигидрированные многоатомные спирты; – гликольэфир	– Время жизни после нанесения; – отделяемость от шаблона; – стойкость к разбрызгиванию при нагреве; – осадка (растекаемость); – запах	Обычно используются тяжелокипящие растворители с температурой кипения 220...290 °С. Использование растворителей с низкой температурой кипения ухудшает свойства паяльной пасты

3.4.3. Гранулированный припой в паяльных пастах

Припой — мягкий металл, и получение из него порошка возможно только при переходе его из жидкого состояния в твердое путем различных методов распыления. Предпочтительными методами являются газовое, центробежное и ультразвуковое распыление. Используя их, можно получить малоокисленный порошок с мелкими частицами сферической формы. На рис. 3.5 показано схематическое изображение конструкции газового распылителя. Расплавленный припой, вытекающий из сопла резервуара, бомбардируется струей инертного газа и распадается на множество капелек расплавленного припоя, которые быстро затвердевают, перед тем как коснуться стенок камеры. Собранный порошок направляется на циклонный уловитель для последующей сортировки по размеру частиц. На рис. 3.6 показана схематическая конструкция распылителя с вращающимся диском. Струя расплавленного припоя из плавильного тигля сталкивается с быстровращающимся диском и разделяется на миллионы капелек расплавленного припоя по периферии диска. Далее эти капельки быстро затвердевают в среде холодного инертного газа и собираются для дальнейшей сортировки [7].

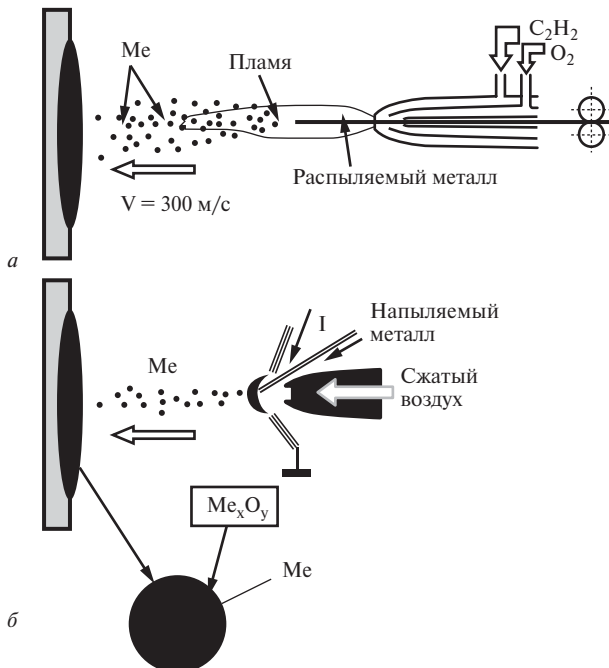


Рис. 3.5. Схема процесса газотермического распыления: а — распыление газовым пламенем; б — распыление в электродуговом разряде

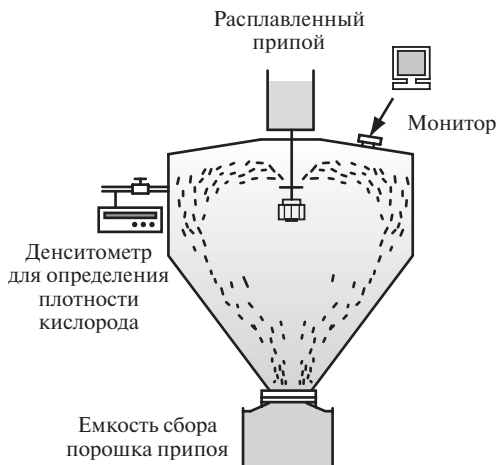


Рис. 3.6. Схема процесса центробежного распыления

Главные задачи этих методов:

- получить мелкую дисперсию шариков припоя;
- предотвратить окисление диспергированного припоя.

В процессе газотермического распыления окисление предотвращают созданием нейтральной или восстановительной среды в газовом факеле. Однако большие объемы факела не позволяют полностью контролировать среду.

Для метода центробежного распыления (рис. 3.6) это сделать проще, если объем бака для распыления и охлаждения диспергированного расплава припоя наполнять контролируемой средой. Порошок припоя получают в емкости высотой около 5 м и диаметром 3 м, наполненной сухим азотом. Слитки припоя плавят в тигле, расположенном в верхней части резервуара. Расплавленный припой капает вниз на шпиндель, вращающийся с большой скоростью. Когда капли припоя попадают на шпиндель, происходит его разбрызгивание в направлении стенок резервуара, при этом припой приобретает сферическую форму и затвердевает до того, как эти частицы достигнут стенок резервуара. Полученные частицы порошка припоя имеют размеры порядка 1...100 мкм.

На распределение размеров частиц припоя и их диаметр влияют многие факторы, в том числе скорость разбрызгивания припоя. Затем порошок припоя сепарируют на сортировочном сите. Обычно применяют метод двойной сортировки порошка припоя. На первой стадии порошок сортируют струей азота от воздуходувки. При этом отсортировываются частицы с размерами меньше нужного. Затем порошок идет на сито, где задерживаются частицы с размерами, превышающими заданные величины.

Для паяльных паст в основном используют частицы двух размеров: 20...40 мкм или 20...50 мкм. Первый размер применяется для плат с шагом

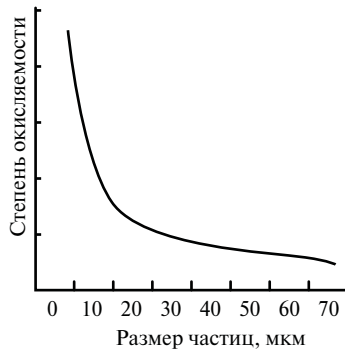


Рис. 3.7. Окисляемость в зависимости от размера частиц

контактных площадок 0,4 мм, а второй — для обычных плат с шагом выводов от 0,5 мм. Предстоящая перспектива пайки микрокорпусов может привести к необходимости использования более тонкого порошка припоя: 15...25 мкм.

Распределение размера частиц прямо влияет на реологию паяльных паст, на печать, на их растекаемость, характер отделения от шаблона, на показатели осадки паст и т. д. Нужный размер частиц следует подбирать по минимальному шагу между контактными площадками и по плотности компоновки.

Содержание кислорода следует тщательно контролировать и поддерживать его на возможно более низком уровне. Чтобы уменьшить количество окисленных частиц, необходимо, чтобы количество частиц с размерами менее 20 мкм было минимальным, поскольку по мере уменьшения размера частиц относительная площадь поверхности возрастает. Из графика на рис. 3.7 видно, что у частиц размером менее 20 мкм уровень окисления значительно выше. Если же в порошке припоя будет высокое содержание окисленных частиц, то при оплавлении они могут образовывать нерасплавленные микросферы припоя.

Сейчас рынок паяльных паст весьма разнообразен, поэтому правильность выбора пасты для конкретного применения приобретает большое значение. При выборе пасты особое внимание следует обращать на распределение размеров частиц припоя в пасте и тщательность сортировки этих частиц по размеру, поскольку эти факторы сильно влияют на показатели паяемости и на печать (рис. 3.8).

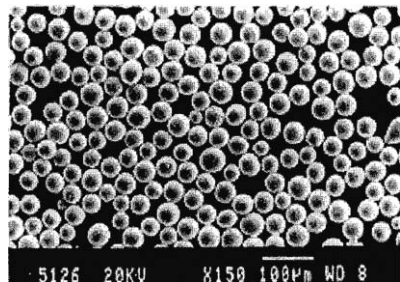


Рис. 3.8. Однородность распределения частиц припоя в пасте

Повышение плотности печати приводит к необходимости использования более мелких частиц припоя сферической формы. Однако при этом

нужно учитывать, что пасты с мелким гранулятом припоя создают сложности при трафаретной печати.

Во время перерыва в печати паста может изменить свою вязкость и тиксотропность, стать более вязкой, в результате чего могут возникнуть проблемы с прилипанием к ракелю, временем его готовности и т.п.

Пока что никому не удалось создать какую-то одну паяльную пасту, которая удовлетворяла бы всем требованиям. Поэтому на рынке присутствует большое разнообразие паст, что позволяет технологам, если они правильно ориентируются, подобрать нужный тип под свои задачи.

3.4.4. Флюсы в паяльных пастах

Другим важным фактором, который влияет на качество и характеристики паяльной пасты, является флюс. Основная роль, которую играет флюс в паяльных пастах, аналогична той роли, которую играет флюс в обычной пайке, т.е. он должен:

1. Удалить оксидную пленку.

Флюс химически расплавляет и удаляет окисную пленку, образовавшуюся на поверхности контактов электронных компонентов, на подложке и в припое.

2. Предотвратить повторное окисление.

Контактные площадки печатных плат, выводы компонентов и порошок припоя в условиях высоких температур при оплавлении быстро окисляются. Твердые компоненты флюса при этих температурах размягчаются и переходят в жидкое состояние и эффективно покрывают и защищают спаиваемые поверхности от повторного окисления.

3. Снижать поверхностное натяжение припоя и повышать смачиваемость.

Флюс временно снижает поверхностное натяжение расплавленного припоя и способствует увеличению площади контакта припоя с подложкой и компонентами (обеспечивает смачивание).

4. Обеспечить реологические показатели и показатели вязкости пасты, требующиеся при печати, сборке и оплавлении.

Рынок предлагает безотмывочные паяльные пасты, галогеносодержащие паяльные пасты и безгалогенные пасты. Требования экологии настоятельно подталкивали промышленность к внедрению процессов, чистых от вредных выбросов. По мере ужесточения требований к технологичности и надежности происходила и соответствующая модификация выпускаемых безотмывочных паяльных паст [8].

Считается, что безотмывочные паяльные пасты не должны содержать галогенов. Но в процессах без отмывки после пайки можно использовать и галогеносодержащие пасты, ибо вопрос «мыть или не мыть» следует решать только исходя из требований к надежности готового продукта. Во всяком

случае, использование влагозащитных покрытий заставляет использовать процессы отмывки и отказываться от использования галогеносодержащих паст, так как отмыть их до конца из пористых материалов оснований печатных плат затруднительно.

Для аппаратуры бытового использования с коротким моральным сроком жизни галогеносодержащие пасты (0,2%) в процессах без отмывки после пайки популярнее, чем пасты без галогенов. Галогеносодержащие пасты широко практикуется, например в Японии. Это обусловлено тем, что эти пасты более технологичны в пайке за счет более высокой активирующей способности, но зато они уступают безгалогенным пастам по надежности изоляции. Паяемость и надежность изоляции часто находятся в противоречии в процессах пайки, поэтому технологам приходится искать компромисс между этими критериями качества паяльных паст.

Чтобы скомпенсировать уменьшение активирующей способности из-за отсутствия галогенов в большинстве безгалогенных паст в качестве активатора используют органические кислоты. Более слабые активирующие способности органических кислот по сравнению с галогенами обычно компенсируют их большим количеством в составе паст. Обычные высокоактивные органические кислоты интенсивно поглощают влагу и диссоциируют с образованием коррозионной среды. Поэтому для активации паяльных паст используются менее гигроскопичные органические кислоты. И хотя флюс в этих пастах почти не диссоциирует, при температурах пайки он обладает достаточной активирующей способностью. Однако и слабая диссоциация этих флюсов заставляет считаться с этим в условиях производства и эксплуатации аппаратуры.

3.4.5. Остатки флюсов

Возможность остатков флюсов определяется условиями эксплуатации аппаратуры и агрессивностью коррозионной среды, создаваемой ими в условиях влажной внешней среды.

Отмывку узлов при работе с водорастворимыми паяльными пастами на конечном этапе осуществляют деионизированной водой. Поскольку большинство паяльных паст, как с галогенами, так и без галогенов, основано на канифольных флюсах, то для их отмывки после пайки рекомендуется применять соответствующие растворители и омыляющие реагенты. Многие паяльные пасты могут оставлять на поверхности плат белесый остаток. В основном это тиксотропные добавки, при выборе которых самое пристальное внимание уделяется показателю стойкости к осадке (растеканию после нанесения), а не его отмывке. Те из них, которые легко удаляются при отмывке, обычно не очень эффективны в обеспечении нужного уровня противоосадочных свойств паст.

Кроме того, необходимо учитывать, что канифоль — это смесь органических кислот, сбалансированная по кислотности так, что в смеси она оста-

ется нейтральной. Но при отмывке ее фракции, имея разную растворимость, удаляются с разной скоростью. Менее растворимые фракции (в основном терпиновая кислота), если они остаются на поверхности, гидролизуются влагой воздуха и проявляются в виде белесости. Поскольку при этом кислотный баланс нарушается, эти остатки создают коррозионную среду. Чаще остается недоотмытой терпиновая кислота, создающая щелочную среду и легко гидролизующаяся влагой воздуха.

3.4.6. Заключение

Паяльная паста — важный композиционный элемент технологии поверхностного монтажа. Ее реологические свойства позволяют использовать автоматические средства ее нанесения. В ходе сборки она служит временным клеем и образует электрическое и механическое межсоединение в результате пайки. Химические реакции с участием флюса включают представляют собой кислотно-основные, а также окислительно-восстановительные реакции, причем в технологии поверхностного монтажа в основном применяются первые. Тиксотропность паст нужна для формирования устойчивых отпечатков для временного крепления и последующей пайки оплавлением.

Развитие технологии паяльных паст поддерживает непрерывную миниатюризацию электронной аппаратуры вплоть до перспективных процессов формирования шариковых выводов.

3.5. Клеи

3.5.1. Механизмы полимеризации клеев

Механизмы отверждения клеев можно классифицировать следующим образом [10]:

- высыхание растворов клеящих материалов;
- анаэробная реакция клеев, для которых кислород воздуха является ингибитором реакции полимеризации;
- полимеризация за счет поглощения актиничного (высокоэнергетического) облучения: ультрафиолетового, электронного потока, радиационного облучения;
- анионные реакции (цианоакрилаты);
- отверждение активаторами (модифицированные акрилы).

Соединение за счет растворения склеиваемых поверхностей: простой метод, который использует составы для растворения соединяемых термопластичных частей. Пример типичного в применении соединения — склеивание полихлорвиниловых трубок с термопластичными наконечниками в набор трубок. В то время как сварка с помощью растворителей обладает рядом преимуществ, будучи быстрым, недорогим и простым способом соединения, растворители имеют некоторые ограничения. Так как метод основывается на растворении



материалов, то реактопласт, стекло и металл ни могут быть соединены вместе этим методом. Большие зазоры трудно заполнить, а различные типы полимеров не могут быть соединены друг с другом. Кроме того, передозировка при использовании растворителя может привести к растрескиванию некоторых аморфных пластмасс. Галогеновые растворители типа этилендихлорида и метиленхлорида могут наносить вред окружающей среде. Некоторые растворители очень огнеопасны; некоторые рассматриваются как потенциальные канцерогенные вещества. Персонал, работающий с этими веществами, должен быть защищен от вдыхания паров растворителей.

При полимеризационном склеивании клеевое соединение не имеет вышеперечисленных недостатков. Способность соединять различные материалы, например термопластики, термореактивные пластмассы, стекло и металл, является важным преимуществом. Клеящие вещества хорошо заполняют зазоры и способны формировать герметичное уплотнение между двумя поверхностями. Так как клей является жидкостью, то он должен быть преобразован в твердое вещество посредством процесса отверждения, например теплотой, влажностью, светом, поверхностным иницированием или смешиванием реактивных компонентов.

Большинство клеев — реактивные полимеры. Они переходят из жидкого состояния в твердое за счет различных реакций полимеризации (например, эпоксидные композиции) и поликонденсации (фенолоальдегиды), отверждения за счет соединения с атмосферной влагой (силиконы, уретаны) или кислородом воздуха (олифы).

Термореактивные полимеры в процессе отверждения проходят три фазы:

стадия А — исходные продукты полимеризации смешаны и готовы вступить в реакцию при нагреве. Без нагрева реакция тоже идет, но медленно. Как правило, исходная смесь растворена в растворителях, замедляющих взаимодействие исходных продуктов;

стадия В — из исходной смеси удалены растворители; продукты вступили в реакцию полимеризации, но она находится только в начальной стадии. В этой стадии продукты еще способны растворяться, плавиться, формоваться. Без растворителя они представляют собой сухие продукты, способные к затариванию и транспортировке;

стадия С — реакции полимеризации завершены и продукты более не способны пластически менять форму, плавиться, растворяться. Продукт в стадии С теряет способность к переработке. Его формы устойчивы. При нагреве они только разрушаются (разрушаются, горят).

Клеи, если они поставляются в готовом виде, находятся в стадии В, и для отверждения их подвергают нагреву или УФ-облучению.

Анаэробные клеи — это однокомпонентные материалы, которые отверждаются при комнатной температуре в условиях отсутствия контакта с кислородом. Жидкий компонент отверждения остается неактив-

ным до тех пор, пока он находится в контакте с атмосферным кислородом. Если клей лишен доступа атмосферного кислорода, например при соединении деталей, происходит быстрое отверждение, особенно при одновременном контакте с металлом. Это отверждение может быть представлено следующим образом: при прекращении поступления атмосферного кислорода формируются свободные радикалы под действием ионов металла (Cu, Fe) [10].

3.5.2. Назначение клеев в сборочно-монтажных процессах

Клеящие составы для поверхностного монтажа предназначены для закрепления компонентов на печатных платах. Клеи должны обладать приемлемыми тиксотропными и реологическими свойствами, которые позволили бы производить их нанесение на высоких скоростях (порядка 40 000 точек в час) с использованием высокоскоростного дозирующего оборудования, исключающего загрязнение контактных площадок, образование тянущихся нитей и пропуск точек. После нанесения на поверхность плат клеи должны сохранять устойчивую форму в виде точек для закрепления широкого диапазона компонентов различного размера и массы. Требования к клеям применительно к технологиям поверхностного монтажа:

До отверждения:

- порции клея быть соизмеримы с очень малыми компонентами, такими как 0402 и 0603. Для этого они требуют строгого гранулометрического контроля, который возможен при использовании специальной технологии смешивания, обеспечивающей нужную дисперсию и предотвращающей закупорку наконечника дозатора;
- порции клея, не прошедшие термическую обработку, должны обладать достаточной удерживающей способностью (прочностью неотвержденного материала), достаточной для сохранения правильного положения больших компонентов относительно контактных площадок;
- неотвержденный клей не должен абсорбировать влагу из атмосферы.

После отверждения:

- клеевое соединение должно быть достаточно прочным, чтобы удерживать компоненты различной формы, размера и массы на различных монтажных подложках с различными покрытиями, включая органическое защитное покрытие (OSP);
- клеи должны сохранять прочность клеевого соединения в процессе пайки волной припоя, при котором температура материала может достигать 270 °C;
- клеи должны обладать хорошими электроизоляционными характеристиками, в том числе во влажной среде, для предотвращения электромиграции и коррозии, приводящих к отказу изделий.

3.5.3. Прочность клеевого соединения

Для оценки прочности склеивания используют два понятия: адгезию и когезию. Адгезия — прочность сцепления клея со склеиваемыми поверхностями, когезия — прочность клеевой прослойки. Конечно, адгезия во многом зависит от подготовки склеиваемых поверхностей, но в конечном итоге клей может оказаться совсем не подходящим для каких-то материалов. Существует понятие о сродстве компонентов склеиваемой системы: клей, растворитель и склеиваемые поверхности. Они должны относиться к одной физико-химической группе веществ, например к полярной или неполярной, к гидрофобным или гидрофильным и т.д.

Паяльные маски на некоторых платах, а также сами компоненты могут не соответствовать некоторым клеям и стать причиной плохого схватывания клеем. Маски, нанесенные на платы, и компоненты могут обладать низкими показателями поверхностного натяжения или содержать технологические добавки, которые могут выступить в качестве антиадгезионных реагентов. Поскольку пользователь не может полноценно контролировать адгезионные свойства компонентов и плат или вообще не имеет этой возможности, последнее поколение клеев предусматривает высокую степень сродства с известными материалами масок и компонентов, используемыми в настоящее время. При выборе клеев приходится ориентироваться и на их способность к склеиванию с определенным материалом, что должно указываться в их сертификате.

Когезионные свойства клеев проявляются в процессе сборки. Перед попаданием в сушильную печь платы испытывают воздействие работы различных автоматов, размещающих микросхемы и компоненты на сырые точки клеящего состава на поверхности платы. Многие из этих машин основаны на перемещении стола в координатах X–Y, подвергая компоненты и сырой клеящий состав воздействию ударных сил ускорения и торможения. Если сырой клей не обладает достаточной прочностью, подобные воздействия могут вызвать смещение выводов компонентов относительно контактных площадок.

Прочность неотвержденного клея или прочность сырого клея тестируется по соответствующим стандартам в процессе приемки клеящих составов для поверхностного монтажа. Тестирование заключается в наблюдении возможного смещения компонентов при соударении платы с упором при скольжении печатной платы с компонентами по зафиксированной наклонной плоскости.

Вязкость эпоксидных клеев со временем повышается, поскольку происходит медленное испарение растворителей, сопровождающееся процессами полимеризации состава. Поскольку этот процесс можно замедлить при низких температурах, рекомендуемая температура хранения составляет 2...8 °C, это позволяет свести процессы полимеризации к минимуму, поддерживать рабочие характеристики клея в течение длительного времени и гарантиро-

вать максимальный срок хранения без потери его заявленных характеристик технологичности.

3.5.4. Влагоустойчивость клеев

Клеи по своей природе склонны к поглощению атмосферной влаги. И если не принять соответствующих мер, точка клеящего состава может закипеть и «взорваться» в процессе термической обработки. Такое явление приводит к образованию пустот, ослабляющих соединение, и каналов, по которым припой будет проникать под компонент с возможностью короткого замыкания из-за перемычек припоя. Вспучивание клея обычно происходит в печи оплавления или в установке пайки волной припоя, когда клей, набравший влагу, нагревается до температур выше 100 °С или когда при термическом отверждении клея используются большие темпы нарастания температуры, не соответствующие скорости выхода влаги из клеевых точек.

Обычно пористая структура свойственна клеям, содержащим в исходном состоянии растворители. При сушке клея удаляемый из него растворитель образует каналы выхода в виде пор. Пористая структура клея уменьшает область контакта клея с компонентом, приводит к ослаблению прочности приклеивания и, как следствие, к утере компонентов в ходе пайки волной припоя. Кроме того, в линиях пайки в модулях флюсования и предварительного нагрева перед пайкой флюс может проникать в пустоты клея, и удалить его оттуда чрезвычайно трудно. Остатки флюса со временем могут привести к образованию коррозионной среды и деградации изоляции.

Находясь в шпирце, клеи не имеют контакта с атмосферной влагой. Однако при длительной паузе между нанесением и отверждением клей может набрать недопустимое количество влаги. Абсорбция влаги может стать главной проблемой при трафаретной печати клеевых точек. Чтобы избежать этого, большинство клеев составлены из материалов, обладающих низкой способностью к впитыванию влаги, что обеспечивает стабильность процессов в течение как минимум недели.

3.5.5. Требования к поверхностному сопротивлению

Требования к клеям не ограничиваются их способностью удерживать компоненты в процессах групповой пайки. Поскольку отвержденный клей остается на поверхности платы на весь срок службы устройства, он не должен являться источником коррозии или электрохимической миграции в условиях высокой влажности. Тестирование поверхностного сопротивления является одним из многочисленных испытаний, которые проходят клеи нового поколения. Тестирование производится для клея, нанесенного на открытые медные проводники. Ширина проводников, шаг между выводами, напряжение при тестировании и толщина клеящего материала устанавливаются заказчи-



ком, который также определяет условия окружающей среды при тестировании и продолжительность тестов.

Высказывается мнение, что химическая структура клеящих составов для поверхностного монтажа окончательно сформировалась и далее не предвидится существенных улучшений. Но с внедрением струйных дозаторов и высокоскоростной трафаретной печати всегда существует потребность в клеящих составах с повышенными скоростными характеристиками, соответствующими требованиям «Hi-Tech». В настоящий момент уже существуют требования для систем двойного отверждения: ультрафиолетом и тепловой для одновременной двусторонней пайки оплавлением. Ожидаемое преобладание бессвинцовой технологии пайки также повлияет на появление новых требований к рабочим характеристикам клеев следующего поколения.

3.5.6. Клеевые композиции

3.5.6.1. Связующие

Основой всех клеев являются полимеры или смесь полимеров – сополимеры. Полимер связывает в единое целое другие компоненты системы и придает клею основополагающие свойства. Таким образом, полимерные вещества (смолы) является связующими.

Клеи и клеевые композиции, используемые в технологии поверхностного монтажа, изготавливаются в большинстве случаев на основе эпоксидных, акриловых и цианакриловых смол. Кроме того, известны клеи на основе уретанов, полиимидов, эпоксидно-акриловых и уретано-акриловых композиций.

Эпоксидные смолы обладают хорошей стойкостью к действию растворителей, влагоустойчивы, имеют хорошее заполнение и стойки при высоких температурах. Их полимеризация может производиться под действием ультрафиолета.

К недостаткам относится низкая сохранность, особенно при хранении вне холодильника, и то, что они в основном двухкомпонентные, т.е. требуют подготовки к использованию. Акриловые смолы обладают хорошей влагостойкостью и устойчивостью к действиям растворителей, имеют малое время полимеризации, долговечны.

Цианакриловые смолы имеют лучшие прочностные свойства по отношению к другим смолам, малое время полимеризации при обычной температуре.

К недостаткам относятся повышенная чувствительность к влаге, плохое наполнение, химическая агрессивность, плохая стойкость в процессе пайки, так как они являются термопластами.

Полиуретановые и полиимидные клеи имеют хорошие клеящие свойства и температурные стабильности характеристик клеевых соединений. Полимеризация происходит при высоких температурах.

Полиуретано-акриловые композиции полимеризуются медленно, под действием ультрафиолетового или инфракрасного излучения, а также горячего воздуха.

Наибольшее распространение в настоящее время получили клеи на основе эпоксидных смол.

Пластические массы могут состоять из одного высокомолекулярного вещества, а у других высокомолекулярное вещество служит связующим, и в состав пластмассы входят кроме него наполнители, пластификаторы и красители. Такие пластмассы часто называют композиционными. Свойства композиционных пластмасс обуславливаются свойствами как связующего вещества, так и наполнителей.

3.5.6.2. Наполнители

Наполнители вводят в состав клеев для улучшения механических свойств, уменьшения усадки во время отверждения полимера, повышения стойкости к действию различных сред, а также для снижения стоимости.

В клеях используются порошкообразные наполнители (пудры) на минеральной основе: технический углерод (сажа), измельченный кокс и графит, мел, каолин, тальк, металлическая пудра. Металлические наполнители придают клеям тепло- и электропроводность, стойкость к действию электромагнитного и проникающих излучений.

3.5.6.3. Пластификаторы

Пластификаторы вводят в клеи для повышения эластичности материала, улучшения их морозостойкости и удароустойчивости. В качестве пластификаторов наиболее часто используют сложные эфиры различных кислот и низкомолекулярные полиэфиры.

3.5.6.4. Тиксотропные добавки

При выборе тиксотропных добавок основное внимание уделяется показателю стойкости к осадке — растеканию клея после нанесения. Этот показатель важен и для трафаретного метода нанесения и с помощью диспенсера. После нанесения на посадочные места клею необходимо держать форму и не растекаться. В процессе установки компонентов на клей они могут подвергаться динамическим нагрузкам, с которыми приходится считаться, если стол сборочного автомата вместе с платой движется для позиционирования компонентов.

3.5.6.5. Стабилизаторы

Стабилизаторы вводят в клеи для сдерживания процессов полимеризации при хранении в охлажденном состоянии и для придания клеящим составам устойчивой и стабильной вязкости. Срок хранения всех материалов этой категории в охлажденном состоянии составляет 10 месяцев, а при комнатной температуре — один месяц. Стабилизаторы позволяют использовать клеи в условиях цеха (или внутри дозирующего оборудования) в течение 30 дней без ухудшения рабочих характеристик. Операторы линий вправе рассчитывать

на постоянство качества нанесения точек в течение указанного периода при комнатной температуре, что позволяет поддерживать устойчивость и надежность производственного процесса.

В процессе склеивания и последующей эксплуатации изделий происходит ухудшение физико-механических свойств клеев, т.е. протекает процесс старения. Старение обусловлено воздействием на клеевые соединения многочисленных факторов (тепла, света, кислорода воздуха, влаги, агрессивных химических агентов, механических нагрузок и т.д.), которые создают условия для инициирования и развития нежелательных химических реакций. Для защиты клеев от старения применяют специальные вещества — стабилизаторы-противостарители:

- антиоксиданты — соединения, предотвращающие термоокислительную деструкцию;
- антиозонанты;
- светостабилизаторы;
- антирады — вещества, предотвращающие радиационную деструкцию.

3.5.6.6. Красители

Красители применяют для окрашивания клеев. Для этой цели используют органические красители (пигменты) и неорганические пигменты как наполнители. Органические красители, введенные в клеевую композицию, создают яркие и чистые тона, обеспечивают прозрачность композиции. При использовании неорганических красителей получают непрозрачные окрашенные клеи.

3.5.5.7. Прочие добавки

К ним относятся:

- сшивающие агенты (отвердители), которые вводят в полимеры для создания в них на определенной стадии переработки трехмерной молекулярной сетки, которая обеспечивает повышение прочности (когезии) клеев;
- антипирены, которые снижают горючесть клеев;
- антистатики, которые препятствуют возникновению и накоплению статического электричества;
- антимикробные агенты, которые препятствуют зарождению и размножению микроорганизмов.

3.6. Растворители

3.6.1. Жидкости для отмывок от загрязнений плат

Моющие среды используются для очистки:

- плат перед началом сборки для удаления загрязнений отпечатками пальцев, косметикой и других загрязнений в процессе хранения. Это необходимо, чтобы улучшить качество нанесения паяльной пасты и клея;

- собранных плат, чтобы избежать всевозможных отказов изоляции;
- трафаретов от остатков паяльной пасты или клея;
- плат при ошибочном нанесении паяльной пасты или клея;
- печей и установок пайки волной припоя.

Выбор типа жидкости обусловлен составом входящих в припойную пасту флюса и органических добавок. Находят применение два типа жидкостей: органические и водные растворы моющих средств, причем последние в технологии поверхностного монтажа в настоящее время практически не применяются. Жидкости для промывки сборок должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь возможно большую величину поверхностного натяжения, для облегчения проникновения в узкие промежутки и возможно меньшее его значение для хорошей циркуляции в ограниченном объеме;
- обладать высокой химической энергией по отношению к загрязняющим веществам.

С точки зрения перечисленных требований обычно бывает трудно отдать предпочтение определенному виду жидкости, решающими являются не столько технические, сколько экономические соображения.

Большинство изготовителей аппаратуры используют для промывки стандартные органические жидкости либо их азеотропные смеси, такие как трихлорэтан, хлористый метилен и смеси фреона.

Растворители — индивидуальные химические соединения или их смеси, способные переводить различные вещества в раствор. Так же, как и все химические соединения, растворители разделяют на неорганические и органические. Важнейший неорганический растворитель — вода. Менее известные неорганические растворители — легкоплавкие галогениды (например, BrF_3), оксогалогениды (например, сульфурилхлорид, тионилхлорид), азотсодержащие растворители (жидкий аммиак) и др. Круг органических растворителей гораздо шире.

В соответствии с наличием или отсутствием дипольного момента и величиной диэлектрической проницаемости различают полярные и неполярные растворители [11].

3.6.2. Вода как растворитель

Самым распространенным растворителем на Земле является вода. Для оценки величины молекулы воды достаточно привести длину связи O—H . Она равна 0,0957 нм.

Поскольку атомы водорода и кислорода имеют различную электроотрицательность, а химические связи O—H расположены под углом, отличным от 180° ($104,5^\circ$), молекула воды полярна (диполь). Кроме того, она еще и поляризуема. Эти свойства во многом определяют поведение воды при взаимодействии с другими химическими соединениями.

В отношении воды вещества проявляют гидрофильность или гидрофобность. Если вещество и вода близки по строению друг к другу и сильно взаимодействуют друг с другом, например образуют водородные связи, то говорят о гидрофильности. При слабом взаимодействии вещества и воды говорят о гидрофобности. Мерой интенсивности межмолекулярного взаимодействия служит поверхностное натяжение на границе между веществом и водой.

Вода — прекрасный растворитель. Она хорошо растворяет полярные и ионогенные вещества [11].

3.6.3. Органические растворители

Большинство растворителей нефтяного происхождения имеют исторически сложившиеся названия, которые часто абсолютно не связаны с их составом и химической природой соединений, входящих в их состав.

Поскольку нефрасы являются смесью фракций, для них не характерна фиксированная температура кипения. Они выкипают в определенном диапазоне температур. Так, например, нефрас 130/150 — смесь, выкипающая в диапазоне температур от 130 до 150 °С.

В отличие от нефтяных растворителей индивидуальные органические растворители характеризуются константами своих физических свойств. Хотя для технических растворителей также характерен некоторый диапазон, в пределах которого изменяются эти свойства. Но этот диапазон гораздо меньше, чем у нефтяных растворителей. Растворителями богаты практически все известные классы органических соединений: предельные углеводороды; хлорированные углеводороды, ароматические соединения; спирты; простые и сложные эфиры; кетоны и др. Физические свойства некоторых наиболее распространенных органических растворителей приведены в табл. 3.9 [11].

Таблица 3.9. Физические свойства некоторых индивидуальных органических растворителей

Наименование	Температура кипения, °С	Давление насыщенных паров, кПа	Плотность, кг/м ³	Вязкость, мПа·с	Температура вспышки, °С	Растворимость в воде, %	ПДК, мг/м ³
Ацетон	56,1	24,3	0,792	0,318	-20	Хорошая	200
Бензол	80,1	13	0,879	0,647	-11	0,18	5
1-Бутанол	117,4	0,83	0,810	н/д	34	9,0	10
Бутилацетат	126,3	2,4	0,881	0,732	25	1,37	200

Таблица 3.9. Окончание

Наименование	Температура кипения, °С	Давление насыщенных паров, кПа	Плотность, кг/м³	Вязкость, мПа·с	Температура вспышки, °С	Растворимость в воде, %	ПДК, мг/м³
Гексан	68,7	20,1	0,659	0,326	-23	0,014	300
Диметилсульфоксид	189,0	н/д	1,096	2,473	95	Хорошая	20
N,N-диметилформамид	153,0	0,49	0,944	0,80	58	Хорошая	10
1,4-Диоксан	101,3	4,9	1,036	1,31	12	Хорошая	10
Дихлорэтан	83,5	10,65	1,253	0,840	13	0,81	10
Диэтиловый эфир	34,5	71,2	0,714	0,245	-41	6,5	300
o-Ксилол	144,4	0,88	0,880	0,809	32	0,018	50
Метанол	64,7	н/д	0,792	0,597	10	Хорошая	5
Метиленхлорид	40,1	52,4	1,336	0,435	14	2,0	50
Нитробензол	210,8	0,037	1,205	2,03	87	0,2	3
Перхлорэтилен	121	2,4	1,625	0,90	н/д	0,015	10
Изопропиловый спирт	82,4	н/д	0,7855	2,43	12–22,5	Хорошая	980
Сероуглерод	46,3	2,643	1,263	н/д	-30	0,18	0,01
Толуол	110,6	н/д	0,867	0,584	4	0,014	0,6
1,1,1-трихлорэтан	74,1	16,1	1,338	0,86	н/д	0,44	20
Хлороформ	61,7	26	1,489	0,58	н/д	0,82	250
Циклогексанон	155,7	0,64	0,948	н/д	46	2,3	10
Четыреххлористый углерод	76,7	15,3	1,595	0,969	н/д	0,077	20
Этанол	78,3	8,0	0,802	1,22	12,2	Хорошая	1000
Этилацетат	77,1	12,0	0,901	0,455	-3	9,7	200
Этилцеллозольв	135,6	0,71	0,931	2,1	49	Хорошая	н/д

3.6.4. Смеси растворителей

Смесевые растворители активно используются в технологиях отмывки печатных узлов. Это обусловлено тем, что загрязнения в общем случае содержат в своих молекулярных цепочках гидрофобные и гидрофильные фрагменты. Поэтому растворители для отмывки печатных узлов должны обладать гидрофильно-гидрофобным балансом. Иначе они будут удалять только гидрофильные или только гидрофобные загрязнения. Универсальные растворители загрязнений должны включать компоненты с гидрофобными свойствами (уайт-спирит, толуол, сольвент и др.) и компоненты, имеющие сродство к воде (этанол, этилцеллозольв, ацетон,



этилацетат и др.). В известной спирто-бензиновой смеси первая составляющая отвечает за растворение гидрофильных загрязнителей (особенно остатков канифоли), а вторая — за растворение гидрофобных загрязнителей (жиров и т.д.).

Если отмывку печатных узлов проводить вместо спирто-бензиновой смеси сначала этиловым спиртом, а затем бензином или, наоборот, сначала бензином, а затем этиловым спиртом, то результат, скорее всего, будет плачевным. Высокая эффективность спирто-бензиновой смеси обусловлена ее азеотропными свойствами. Этиловый спирт способен образовывать азеотропные (нераздельнокипящие) смеси, состав которых не изменяется в процессе испарения. Такие смеси при испарении «захватывают» с собой растворенные в них загрязнения. Одиночный растворитель, например бензин, при испарении оставляет на поверхности печатных плат ранее растворенные в нем загрязнения. То же самое можно сказать и об одиночном растворителе — этиловом спирте. На способности образовывать азеотропные смеси с водой основана способность к отмывке и другого спирта — изопропилового, нашедшего применение во многих зарубежных отмывочных жидкостях зарубежного производства [11].

На смену токсичным и недружественным по отношению к окружающей среде органическим растворителям приходят моющие составы на водной основе.

3.6.5. Пожаро- и взрывоопасность органических растворителей

Органические растворители — это летучие и горючие жидкости, способные образовывать с воздухом взрывоопасные смеси.

В научно-технической и нормативно-технической литературе очень часто приводятся характеристики пожаро- и взрывоопасности растворителей: температура вспышки, температура воспламенения, температура самовоспламенения, нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения.

Известны пожаробезопасные растворители, содержащие элементы-антипирены (галогены). В первую очередь следует сказать о фреонах (насыщенных фторхлоруглеводородах). В 70–80 гг. прошлого века фреоны начали активно использовать для отмывки печатных узлов. К сожалению, по объективным причинам это направление в конце концов превратилось в тупиковую ветвь. При ультрафиолетовом облучении в присутствии кислорода воздуха фреоны разрушаются с образованием радикалов. Радикалы диспропорционируют с выделением активных соединений, реагирующих с молекулами озона. Это приводит к снижению концентрации озона в стратосфере и образованию так называемых озоновых дыр. Венская конвенция 1985 г. и Монреальский протокол 1987 г. ввели запрет на производство и использование фреонов в технологических процессах. Однако не исключено, что это

направление может вновь возродиться. Во всяком случае, разработки новых экологически безопасных фреонов, способных разрушаться в атмосфере с образованием малоактивных веществ, ведутся [11].

3.6.6. Антипирены

Современная электронная техника немыслима без использования полимеров. Но, к сожалению, большинство полимеров горючи. К чему может привести короткое замыкание в сочетании с горючим полимером, объяснять не нужно. Поэтому проблема снижения горючести полимерных материалов, используемых в производстве электронной техники, очень актуальна. Стимулирующее воздействие на решение этой проблемы оказали еще и страховые компании. Как следствие, наиболее распространенным стеклотекстолитом, используемым для изготовления электронной аппаратуры, стал FR-4. Снижение горючести этого стеклотекстолита достигается бромированием его эпоксидной полимерной матрицы. Аналогичного результата можно добиться путем введения в полимер низкомолекулярных соединений, содержащих элементы-антипирены. Снижение горючести полимеров достигается введением в их состав и других химических элементов-антипиренов, например хлора, фосфора.

Отказ от использования органических растворителей как легковоспламеняющихся и токсичных жидкостей, безусловно целесообразен, где это возможно. Эта тенденция явно прослеживается в реальных технологиях производства электроники, чему в немалой степени способствуют законодательные акты ограничительного действия в области защиты окружающей среды. Но с другой точки зрения полный отказ от растворителей невозможен, так как это лишит нас возможности использовать прошлые, настоящие и будущие оригинальные технические решения, многие из которых без использования растворителей реализовать, увы, невозможно.

3.7. Заключение

Исследования и производство материалов для монтажной пайки, профессионально выполняемые специализированными фирмами, создали рынок с большим разнообразием предложений. Большая часть результатов этих исследований патентуется, что делает невозможным их произвольное воспроизводство без приобретения лицензии на KNOW-HOW. Поэтому весь мир пользуется готовыми продуктами для монтажа аппаратуры, ориентируясь на их сертификаты и репутации фирм-поставщиков. Тем не менее приведенные в этой главе сведения позволяют правильно оценивать обстановку в производстве в случае возникновения каких-либо неурядиц и разговаривать на одном языке с поставщиками материалов при предъявлении к ним претензий.



Литература

1. ОСТ 4Г0.033.200. Флюсы и припои для пайки. Состав. Свойства. Область применения.
2. Нинг-Ченг-Ли. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP Flip-Chip технологии. — М.: Издательский дом «Технологии», 2006.
3. Медведев А. Бессвинцовые технологии монтажной пайки. Что нас ожидает? // Электронные компоненты, 2004, № 11.
4. Медведев А. Покрытия под пайку // Технологии в электронной промышленности, 2006, № 2.
5. J-STD-020-B. Стандарт для определения чувствительности к влаге в процессе пайки оплавлением негерметичных твердотельных компонентов для SMT-монтажа.
6. www.estek.ru. Сухие шкафы для хранения SMD-компонентов.
7. Кузьмин В. Материалы для пайки печатных узлов при производстве современной РЭА // Электронные компоненты, 2001, № 6.
8. ЗАО «Предприятие ОСТЕК». Справочное руководство по выбору и применению материалов для производства и ремонта электронной аппаратуры.
9. www.mettatron.ru. Паяльные пасты. Все о главном.
10. www.loctite.com.
11. Уразаев В. Растворители // Технологии в электронной промышленности, 2006, № 5.

ГЛАВА 4

МОНТАЖНАЯ МИКРОСВАРКА

4.1. История сварки

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. 4.1 показан пример таких межсоединений, чтобы представить место микросварки в современной электронике.

Сварка используется человеком с VII...VIII века до нашей эры в виде кузнечной сварки, при которой соединяемые поверхности (в основном — стали) разогревались в кузнечном горне и затем сковывались. Деформации свариваемых поверхностей при ковке раздвигают поверхностные пленки и освобождают их от окисных пленок для сварного соединения. Таким образом, например, изготавливалась булатная сталь, — тонкие стальные полосы сковывались в форму меча и затем закаливались по режимам, секрет которых утерян.

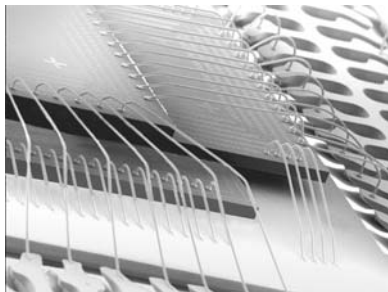


Рис. 4.1. Иллюстрация микроскопических размеров межсоединений кристаллов микросхем с подложкой

Для цветных металлов издревле использовалась литейная сварка.

До конца XIX века ничего нового в технологии сварки не появлялось.

В 1802 г. наш физик-экспериментатор *Петров*, соединив последовательно в большую батарею десятки гальванических элементов, получил мощный энергетический источник, от которого получил устойчивый электрический разряд, названный им вольтовой дугой (в честь популярного тогда ученого — *Вольта*). В дуговом разряде плавилась металлы. В 1882 г. *Бенардос* и в 1890 г. *Славянов* предложили использовать электрическую дугу для сплавления метал-

лов — соединения сваркой. С начала XX века электрическая сварка стала ведущим способом соединения сталей.

В 1903 г. француз *Фуше* запатентовал в Германии газовую сварку.

Во второй половине XX века для сварки стали использовать и другие виды энергии: плазму, электронный, фотонный и лазерный лучи, взрыв, ультразвук и др. Теперь разновидностей сварок так много, что потребовалась их классификация:

- 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.

4.2. Место микросварки в производстве электроники

У современных изделий электроники размеры монтажных элементов настолько малы, что образование зоны плавления, какая 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 использовать 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 преимущества монтажной микросварки состоит в том, что она создает не разрушающиеся 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 — многокристалльные модули связано с использованием микросварки как основного метода формирования межсоединений между кристаллами микросхем и монтажной подложкой.

4.3. 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 ка-

чеством 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.

4.4. 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 межатомного взаимодействия. Получению прочного соединения способствует также взаимная диффузия материалов и образования твердых растворов в тонкой приграничной области.

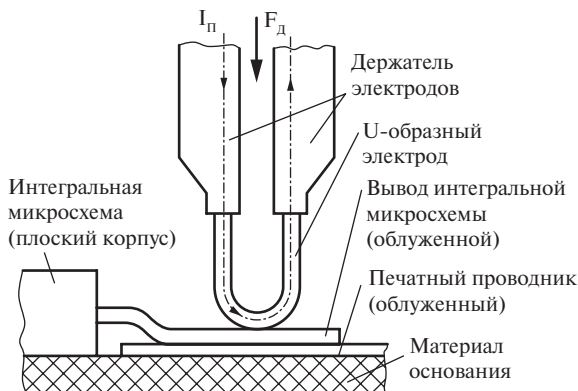


Рис. 4.2. Схема термокомпрессионной микросварки выводов микросхем к контактным площадкам монтажной подложки: I_p — ток подогрева инструмента; F_d — усилие давления электрода на зону сварки

Тепловая энергия при этой сварке поступает в зону соединения путем теплопередачи от поверхности инструмента, нагреваемого импульсом тока (рис. 4.2).

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, ситалле). Применение термокомпрессионной микросварки ограничено приемлемыми сочетаниями свариваемых материалов, например, весьма трудно сваривать ковар, 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. 4.3), по форме сварного соединения, обуслов-

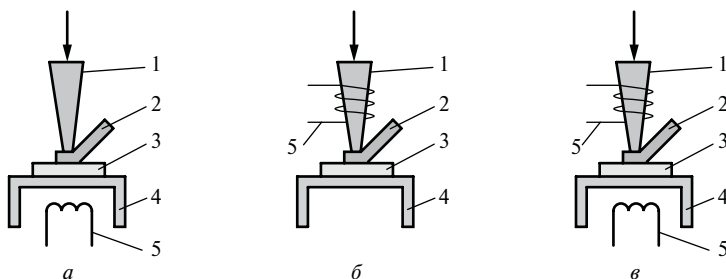


Рис. 4.3. Разновидности термокомпрессии в зависимости от способа нагрева: *а* — нагрев только рабочего столика, *б* — нагрев только рабочего инструмента, *в* — одновременный нагрев рабочего столика и инструмента, 1 — рабочий инструмент; 2 — присоединяемый вывод; 3 — монтажная подложка; 4 — рабочий столик; 5 — нагреватель

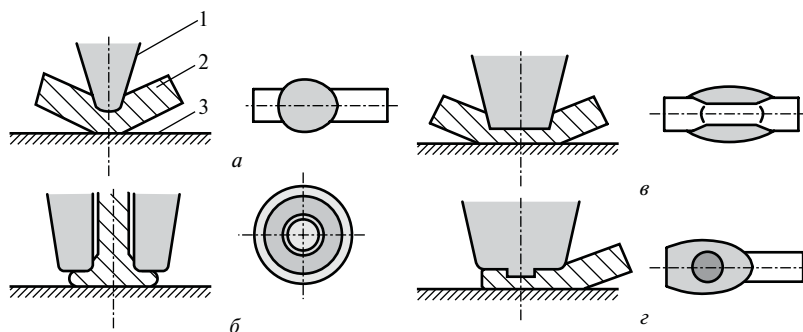


Рис. 4.4. Основные виды термокомпрессионных соединений: *а* — соединение в виде плоской сварной точки (термокомпрессия клином), *б* — соединение встык (термокомпрессия капилляром с деформацией шарика), *в* — соединение с ребром жесткости (термокомпрессия инструментом с канавкой), *з* — соединение типа «рыбий глаз» (термокомпрессия инструментом с выступом), 1 — инструмент, 2 — проволока, 3 — подложка

ленной инструментом (рис. 4.4), по видам соединений: внахлест или встык (рис. 4.5). На рис. 4.6 показана фотография формообразования сварки встык с образованием шарика.

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 $0,1...0,5 \text{ мм}^3$ 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.

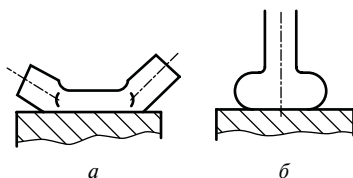


Рис. 4.5. Сварные соединения: *а* — внахлест, *б* — встык с образованием шарика

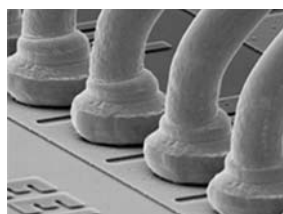


Рис. 4.6. Шарик сварного соединения встык

При наложении на инструмент ультразвуковых тангенциальных колебаний (рис. 4.7) 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.

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 вывода 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/мм², приверженность к образованию с алюминиевыми покрытиями кристаллов микросхем хрупких и пористых соединений типа Al_3Au . Использование выводов из чистого алюминия также ограничено из-за невысокой прочности — 75 Н/мм². Это вынуждает увеличивать диаметр проволоки до 100 мкм, а это влечет за собой увеличение размеров контактных площадок. Лучшие характеристики демонстрируют алюмо-кремниевые и алюмо-магниево-кремниевые сплавы, прочность которых составляет 450 Н/мм². Проволоки для микросварок из этих сплавов выпускают диаметром 27...50 мкм.

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

Температура процесса — 150...350 °С, длительность импульса нагрева 0,2...0,5 с. Давление передается соединяемым деталям электродом, радиус которого приблизительно соответствует диаметру проволоки. Это давление составляет 0,2...1,5 Н (20...150 гс). Материал электродов выбирается исходя

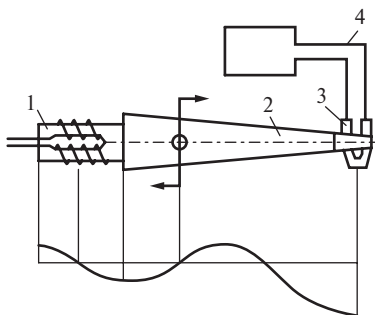


Рис. 4.7. Схема термокомпрессионной сварки с наложением ультразвуковых колебаний

из необходимости обеспечения низкой теплопроводности, высокой прочности при температурах до 500 °С, 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. 4.8), 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.

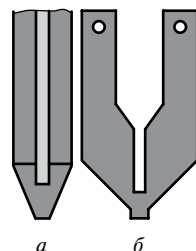


Рис. 4.8. Примерная форма инструмента, нагреваемого проходящим током

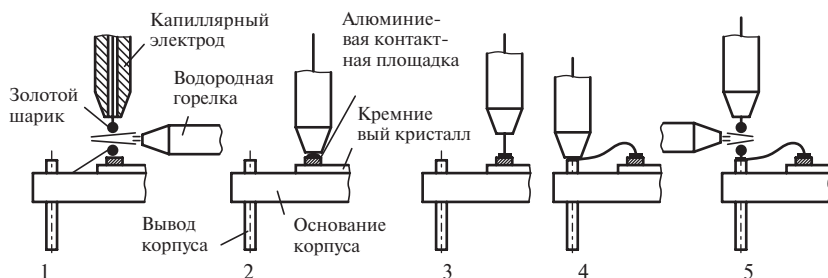


Рис. 4.9. Схема процесса микросварки: 1 — оплавливание золотой проволоочки с образованием шарика; 2 — присоединение проволоочки к контактной площадке кристалла; 3 — подъем капиллярного электрода; 4 — присоединение проволоочки к внешнему выводу корпуса; 5 — подъем электрода и оплавливание проволоочки

Последовательность операций соединения контактных площадок на кристалле микросхем с внешними выводами корпуса или монтажной подложки показана на рис. 4.9, а машина для микросварки — на рис. 4.10.



Рис. 4.10. Машина для микросварки

4.5. Ультразвуковая сварка

Этот вид микросварки применяется для соединения деталей, нагрев которых затруднен, или при соединении разнородных металлов или металлов с прочными окисными пленками (алюминий, нержавеющие стали, магнитопроводы из пермаллоя и т.п.).

Неразъемные соединения образуются при совместном воздействии на инструмент механических колебаний высокой частоты и относительно небольших сдвливающих усилий. Сочетание этих воздействий приводит к выделению тепла за счет трения поверхностей, стиранию окисных пленок и сглаживанию неровностей с созданием чистых поверхностей, что интенсифицирует процесс образования активных центров и приводит к образованию соединения. Акустической энергии, как правило, достаточно для образования сварного соединения. Однако надежней к деформационному активированию трением добавлять термическое активирование.

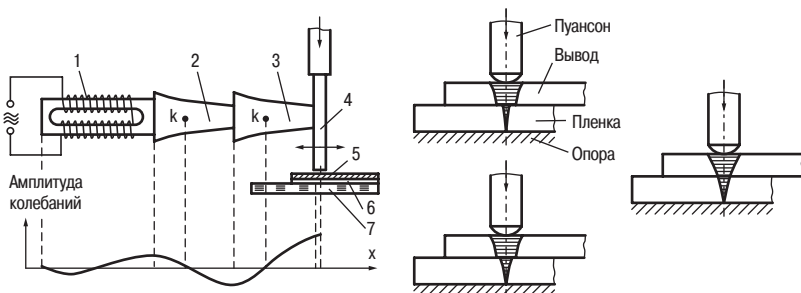


Рис. 4.11. Принцип ультразвуковой сварки: 1 — магнестрикционный преобразователь; 2 и 3 — концентраторы ультразвуковых колебаний; 4 — пуансон; 5 — вывод; 6 — пленка алюминия; 7 — подложка; к — узлы колебаний

С помощью пуансона вывод прижимается к контактной площадке, прикладываются ультразвуковые колебания перпендикулярно направлению приложения давления с частотой 20...60 кГц. Для получения колебаний применяются магнестрикционный (до 20 кГц) или пьезоэлектрический (40...60 кГц) генератор колебаний, от которого кинетическая энергия через концентратор передается к месту сварки (рис. 4.11). В результате высокочастотного трения соприкасающиеся поверхности не только разогреваются, но и освобождаются от поверхностных пленок, обнажая свежие активированные поверхности. Соприкосновение обнаженных от разделительных пленок поверхностей приводит к прочному их соединению на атомарном уровне.

Основные параметры ультразвуковой сварки: амплитуда и частота колебаний инструмента, внешнее давление и температура, если используется внешний нагрев. Нагрев до 150...200 °С сокращает время и улучшает качество сварки. Время сварки подбирается экспериментально в диапазоне 0,3...0,5 с.

4.6. Микросварка расщепленным электродом

Эта микросварка заключается в одностороннем подводе к зоне соединения сварочного тока от двух электродов, имеющих зазор порядка 100...300 мкм (рис. 4.12). Для образования настоящего сварного ядра необходимо заставить поток тока протекать через нижний из свариваемых металлов. Это достигается расстановкой электродов на расстоянии в 3...5 раз больше толщины свариваемого пакета.

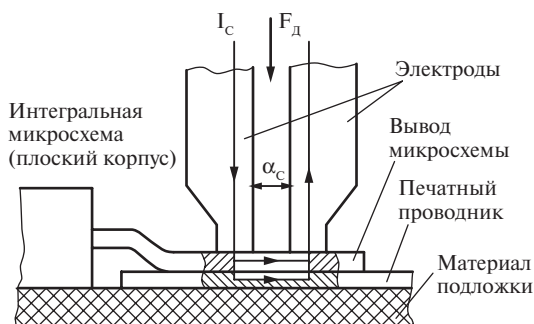


Рис. 4.12. Сварка расщепленным электродом: I_c — сварочный ток; F_d — сила давления электродов; α_c — зазор между электродами

К сожалению, при сварке неизбежно выделяются пары органических веществ из диэлектрического основания монтажных подложек (печатных плат). В этом виде сварки они конденсируются на сварочных электродах, образуя тонкую диэлектрическую пленку, которой достаточно, чтобы сделать процесс неустойчивым. Поэтому электроды нужно периодически чистить.

Принцип сварки расщепленным электродом сводится к разогреву свариваемых проводящих деталей протекающим током. Количество джоулева тепла:

$$Q = F R t,$$

причем $R = R_k + R_d + R_m$,

где t — время сварки; R_k — контактное сопротивление электродов с деталью; R_d — сопротивление току свариваемых деталей; R_m — сопротивление току между свариваемыми деталями.

Для образования настоящего сварного ядра необходимо заставить ток протекать через нижний слой свариваемых деталей. Это достигается установкой зазора между электродами a_c , который должен составлять от двух до пяти суммарных толщин выводов. Вследствие отталкивающих сил между двумя параллельно протекающими токами появляется эффект выдавливания тока в нижний слой.

Сварочный импульс формируют, как правило, разрядом конденсатора. Так как в серийном производстве переходные сопротивления R_k и R_m посто-

янно колеблются, имеется опасность при однажды установленном сварочном токе, что соединение или прогорит, или энергии не хватит, чтобы реализовать сварку.

Поскольку медные контактные площадки на печатной плате имеют относительно большую проводимость, их нагрев затруднен. Поэтому, если предусматривать именно этот метод монтажной микросварки, приходится никелировать поверхность меди, чтобы увеличить выделение джоулева тепла. Другой прием улучшения условий микросварки — золочение выводов микросхем. Золотое покрытие оплавляется в процессе сварки и действует как твердый припой, т.е. процесс сварки переходит в твердую пайку с золотом в качестве припоя.

В технологии микросварки расщепленным электродом следует учитывать следующие факторы:

- при сравнительно малых усилиях сжатия и малых собственных электрических сопротивлениях соединяемых деталей тепло преимущественно выделяется на контактных сопротивлениях между деталями и между электродами и верхней свариваемой деталью;
- при жестких режимах сварки (короткие и мощные импульсы тока) и недостаточно чистых свариваемых поверхностях возможны на начальном этапе испарения и выплески металла, неустойчивость качества сварки;
- режимы сварки существенно зависят от множества факторов: состояние поверхностей, размеры и формы электродов, усилие давления, форма, длительность и своевременность тока нагрева;
- при разнородности металлов деталей по термоЭДС возможно проявление эффекта Пельтье в смещении сварной зоны в одну из деталей.

Типичные режимы микросварки расщепленным электродом показаны в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Оптимальные режимы сварки расщепленным электродом

Соединяемые металлы		Температура, °C	Удельное давление, МПа	Длительность сварочного импульса, с	Деформация вывода, %
Проводник Ø, мкм	Пленка				
Au, 40	Au, Ni, Ag	400...420	40...70	0,2...0,5	50...60
Al, 40	Au, Al	450...550	15...40	0,1...0,5	60...70
Cu, 40...100	Au, Ni, Ag	520...700	60...100	0,2...1,0	50...60

4.7. Точечная электродуговая сварка

Преимущество электродуговой сварки в противоположность сварке расщепленным 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. 4.13).

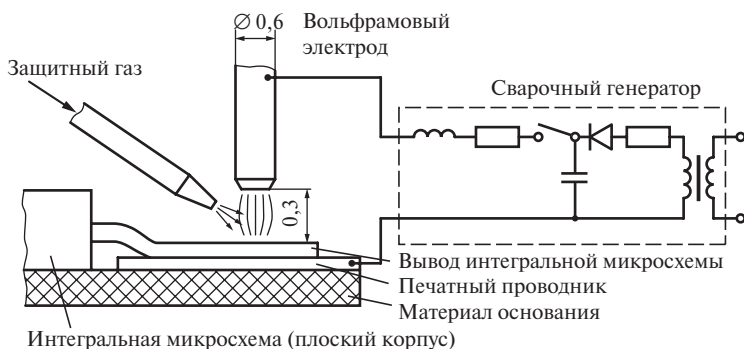


Рис. 4.13. Принцип точечной электродуговой сварки

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.

4.8. Сварка микропламенем

Эта микросварка основана на подаче в зону свариваемого шва остронаправленного пламени диаметром менее 0,5 мм, вызывающего расплавление соединяемых поверхностей. Наиболее удобно использовать пламя горения водорода в кислороде, температура которого 3400 °С. Стехиометрическое соотношение этих газов обеспечивают электролитическим разложением дистиллированной воды в газообразователе, входящем в состав установки для сварки. Для увеличения производительности газовой выделения (разложения воды) в воду добавляют гидроксид калия.

Горелка — тонкое сопло в виде медной трубки с внутренним диаметром 0,3...0,4 мм.

Поскольку водород и кислород образуются из воды в точном химическом соотношении, происходит полное сгорание водорода в кислороде. Продуктом реакции является только вода.

Газ можно обогащать парами метанола для повышения теплотворной способности пламени.

Максимальная плотность мощности — 10^4 Вт/см².

4.9. 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. 4.14).

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

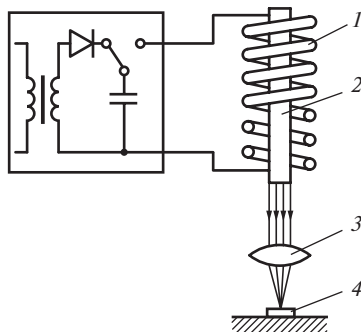


Рис. 4.14. Принцип лазерной сварки: 1 — источник света; 2 — активное тело лазера; 3 — система линз; 4 — вывод микросхемы

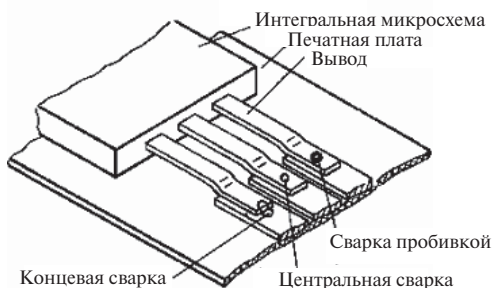


Рис. 4.15. Разновидности монтажной лазерной сварки

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. 4.15):

- 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.

Литература

1. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. Учебник для вузов. — М.: Радио и связь, 1989.
2. Свифт К.Г., Буккер Дж.Д. Выбор процесса. От разработки до производства: — М.: Издательский Дом «Технологии», 2006.
3. Шмаков М.В. Микросварка при производстве микросборок. // Технологии в электронной промышленности, 2006 №№ 5—6.
4. Майк Джуд, Кейт Бриндли. Пайка при сборке электронных модулей: — М.: Издательский Дом «Технологии», 2006.

ГЛАВА 5

НЕПАЯНЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Непаяные методы соединений достаточно распространены, поэтому их нельзя обойти вниманием. Все, кто знаком с автомобильной электроникой, с прокладкой сетей, с вычислительной техникой и средствами коммуникаций, хорошо знают и используют в своей практике методы обжима контактов, в экспериментальных лабораториях активно используют быстро сменяемые условно неразъемные соединения для создания макетов.

Рынок предлагает широкий инструментарий для реализации соединений, условно называемых непаяными.

Наиболее распространенные непаяные соединения: соединения скручиванием и намоткой, под зажим, соединения обжатием (самое распространенное), соединение впрессовыванием контактных штырей в металлизированные отверстия (Press-Fit), соединения проводящими пастами.

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.

5.1. Принципы непаяных соединений

В силовой электронике, в электротехнических сетях непаяные соединения широко распространены: практически все силовоточные соединения выполняются или скрутками, или зажимом под винт. Аллюминиевые 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.

В дальнейшем мы будем рассматривать конструкции и технологии непаяных соединений с позиций обеспечения пластической деформации и удержания их с герметичностью контактной зоны.

Обусловленность применения непаяных соединений будет определять конкретная конструкция контактов. Но 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.

5.2. Монтаж соединений накруткой

Монтаж накруткой предназначен для получения электрических соединений с помощью одножильных проводов и штыревых выводов. Он был разработан в начале 50-х гг. 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.

5.2.1. 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. 5.1). Электрический контакт возникает в зонах контакта провода с острыми кромками вывода (рис. 5.2). Натяжение провода при накрутке позволяет разрушить пленку оксидов на контактирующих металлах, способствует вдавливанию провода

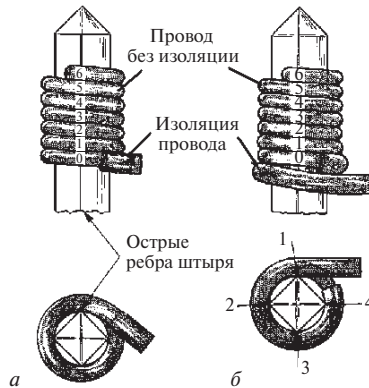


Рис. 5.1. Соединение накруткой провода на хвостовик разъема: *а* — регулярная накрутка; *б* — модифицированная накрутка

в острые кромки вывода и образованию газонепроницаемого соединения (рис. 5.3). 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.

Соединение накруткой должно удовлетворять следующим требованиям:

- минимальные номинальное и переходное сопротивление;
- газонепроницаемость для исключения коррозии;
- сумма площадей зон контакта должна быть больше поперечного сечения провода;

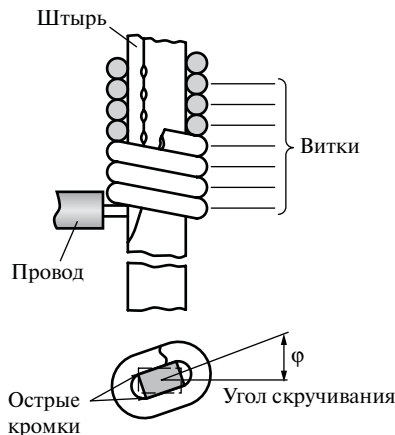


Рис. 5.2. Деформации в накрутке

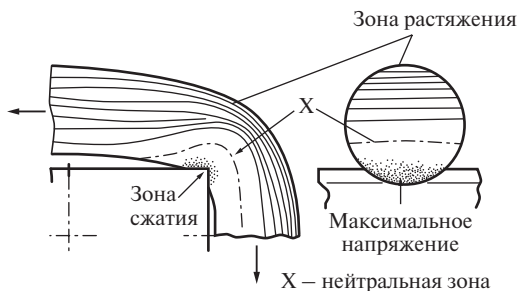


Рис. 5.3. Напряжения и деформации в зоне сжатия провода в накрутке. Давление провода раздвигает окислы, образуется газонепроницаемый металлический контакт

- 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 многovitковым.

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.

5.2.2. Конструкции соединений накруткой

Для накрутки применяют одножильный провод диаметром 0,17...1,2 мм. Провод большего диаметра требует увеличения усилия натяжения и использования более прочных выводов.

Вывод должен иметь минимум две острые кромки. В соответствии с этим условием применяют выводы с квадратной, прямоугольной, ромбовидной, двойной треугольной, U- и V-образной формой поперечного сечения. Наибольшее распространение получили квадратные и прямоугольные выводы, причем квадратные имеют ряд преимуществ при автоматизации монтажа накруткой.

U- и V-образные выводы обладают большей упругостью по сравнению с прямоугольными при одинаковой площади поперечного сечения. Их применяют в ламповых панелях и реле, а также для монтажа аппаратуры, работающей при температуре 120...180° С. При такой температуре напряжение в проводе в течение 3 ч снижается вдвое, а упругость вывода позволяет сохранить электрические и механические параметры соединения.

Для обеспечения сопротивления скручиванию при навивке площадь поперечного сечения вывода должна быть не меньше площади сечения провода. Обычно отношение диаметра жилы провода к стороне квадратного вывода составляет 0,5...0,6, а к стороне прямоугольного вывода — 0,3...0,5. Отношение сторон штыря прямоугольного сечения должно быть не более 1:3. Радиусы острых кромок выводов по покрытию — 0,05...0,08 мм, параллель-

ность сторон — 0,05...0,06 мм на длине 10 мм, отклонение от плоскостности — не более 0,25 мм.

Длина вывода определяется: 1) диаметром провода; 2) числом витков в соединении; 3) количеством соединений на выводе и составляет 12...38 мм.

Чтобы обеспечить оптимальное число контактных поверхностей с площадью газонепроницаемых участков, превышающей площадь поперечного сечения провода, соединение накруткой должно иметь от четырех до восьми витков для проводов диаметром 0,2...1,2 мм. При расчете числа витков следует учитывать, что вывод квадратной, прямоугольной и ромбовидной форм сечения имеет четыре точки контактирования на виток, V-образной и треугольной — три, U-образной — 2,5. Две первые и две последние точки контакта на первом и на последнем витках не дают надежного соединения. Поэтому число эффективных зон контакта с выводом определяют как сумму всех точек соприкосновения извитого провода за вычетом четырех.

Соединение накруткой должно быть самозапирающимся, чтобы провод не мог сойти со штыря. Симметричные поперечные сечения или имеющие в поперечном сечении эллипс не подходят с этой точки зрения. Из-за наличия сторон, симметричных по отношению к центральной оси штыря с квадратным сечением, самоблокировка провода, навитого на такой штырь, не столь велика, как у штырей с прямоугольно-продолговатым сечением. С этой точки зрения идеальная форма сечения — параллелепипед, асимметрично расположенные края которого предохраняют витки от ослабления. После прекращения воздействия накрутки у одного из углов провод изгибается и здесь уже не контактирует с ребром. Однако когда он попытается также отойти от другого угла, то потянет первый угол к центральной точке штыря, там останавливается, и, таким образом, провод после второго края уже не отделяется, т. е. провод вследствие асимметричности сечения штыря самоблокируется.

При монтаже накруткой применяют три вида соединений: обычное (немодифицированное), модифицированное и бандажное (рис. 5.1).

Немодифицированное соединение получают путем навивки на вывод изолированного участка одножильного провода.

Модифицированное соединение отличается от немодифицированного наличием 1...2 витков изолированного провода. Изоляция снижает вероятность поломки первого витка провода при механических воздействиях (вибрации, смещениях вывода) за счет уменьшения концентрации напряжения в точках контакта. Но габариты такого соединения увеличиваются по сравнению с обычными. Поэтому, когда шаг выводов для накрутки становится меньше 2,5 мм, применение модифицированного соединения затруднительно.

Бандажное соединение состоит из нескольких витков бандажной проволоки. Провод при накручивании захватывает и обжимает штырь и вывод (провод, вывод, шина и др.). Вывод должен прилегать к широкой поверхности штыря.

Наибольшее применение нашло модифицированное соединение, особенно в аппаратуре, подвергающейся механическим воздействиям. При малом шаге между выводами и больших сечениях монтажного провода применяют обычное соединение.

Бандажное соединение рекомендуется для образования контактных соединений с выводами навесных элементов, шинами питания и при использовании для монтажа многожильных проводов, не способных к накрутке.

5.2.3. Закрепление и прочность соединительных штырей

Штыри следует встраивать и закреплять в панели впрессовыванием, завинчиванием, пайкой, так чтобы они прочно, без повреждений сопротивлялись возникающему во время накрутки крутящему моменту, а в дальнейшем — различным механическим нагрузкам.

Надежность соединений тем выше, чем больше прочность штырей на скручивание.

Во время накручивания провода давление, возникающее на контактирующих поверхностях, достигает величины 700 МПа. Вследствие пластической деформации это давление непосредственно после накрутки провода снижается приблизительно до 200 МПа и становится постоянным. Соединение может ослабиться и дальше за счет явлений релаксации (в данном случае — холодной текучести). Испытания на долговечность демонстрируют, что в соединениях накруткой давление не снижается ниже 50% от исходного состояния спустя годы. И такое давление контактирующих поверхностей достаточно для обеспечения необходимой постоянной величины высокой проводимости.

Если на штырь накручивается не один, а три накрутки, каждая из последующих накруток ослабляет предыдущую на 10–20%. Если соотношение размеров поперечного сечения штыря и диаметра и пластичности провода выбраны неправильно, первая (нижняя) накрутка может оказаться настолько ослабленной, что может сойти со штыря. Но и при правильном выборе соотношений первая накрутка ослабляется из-за деформации штыря второй накруткой на 20%, третьей накруткой — на 30%. Но оставшиеся напряжения, удерживающие на штыре первую накрутку, достаточны для обеспечения прочности и надежности соединения.

5.2.4. Технология накрутки

Накрутку провода на штырь производят в следующей последовательности (рис. 5.4):

- выбирают оправку, соответствующую конфигурации штыря и размеру провода;
- нарезают провода заданных длин;

- укладывают провода разной длины в соответствующие ячейки кассы;
- очищают провода от изоляции на заданной длине;
- вставляют провода в отверстие оправки на глубину, определяемую длиной очищенного от изоляции провода (пока края изоляционной обложки не натолкнутся на вход отверстия, куда вставляется провод);
- загибают провод вокруг втулки оправки, так чтобы он не закрывал отверстие, предназначенное для штыря. Свободный конец провода придерживают;
- по таблице соединений находят адрес штыря, с которого начинается цепь соединений;
- оправка с проводом насаживается на штырь, соответствующий началу цепи, и включается вращение оправки;
- находится второй адрес цепи, прокладывается провод между штырями по направлению ко второму адресу, и повторяются операции накрутки.

Поскольку длина цепей разная, длина проводов также указывается в таблице соединений и выбирается из соответствующей ячейки кассы с проводами.

Время собственно накрутки составляет около 1 с, после чего оправку снимают со штыря. Продолжительность всей операции (введение провода, его изгиб, насаживание на штырь, включение вращения, остановка, снятие инструмента) около 2,5 с. Поэтому если провода для накрутки уже подготовлены и разложены по ячейкам кассы, производительность накрутки составляет 1000–1400 соединений в час. Ручная подготовка проводов даже при наличии соответствующих инструментов для снятия изоляции и нарезки на нужную длину менее производительна (в 3–4 раза). Подготовка проводов на автоматах совпадает по производительности с ручной накруткой (1500 проводов в час).

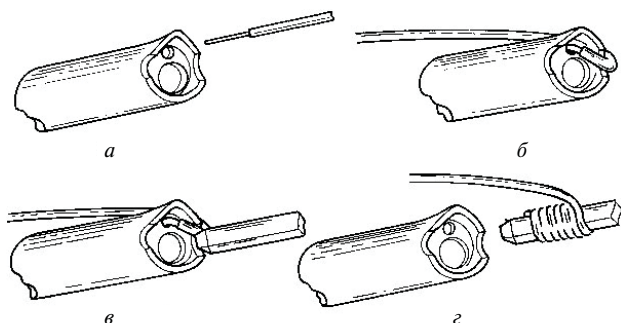


Рис. 5.4. Последовательность операций накрутки: *а* — оправка и зачищенный провод; *б* — провод введен в захватывающее отверстие и фиксируется в оправке; *в* — оправка с проводом надвигается на штырь, включается вращение оправки; *г* — накрутка выполнена

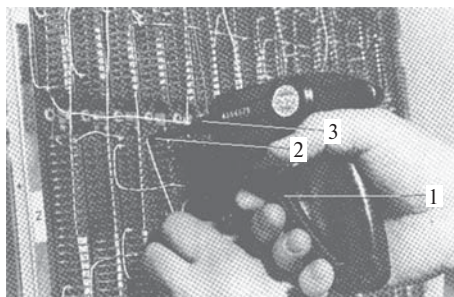


Рис. 5.5. Инструмент для накрутки в руках оператора: 1 — курок инструмента; 2 — оправка; 3 - шпindelь

Считывание информации с таблиц отвлекает оператора и резко снижает производительность накрутки. Поэтому в серийном производстве адреса накруток и проводов в кассе надиктовывают оператору с магнитофона. Заодно чтение адресов накладывают на музыку или радиопостановки, чтобы скрасить оператору монотонность его труда.

При полуавтоматическом монтаже используется программа, которая помогает находить штыри с помощью сигнальных ламп, числовых индикаторов или координатным позиционированием, т. е. подводом инструмента к нужному штырю. В соответствии с программой управления стол и каретка движутся таким образом, что дуло инструмента точно попадает в предназначенный для очередного соединения штырь. Монтажник только насаживает дуло инструмента на штырь и, приведя инструмент в действие, производит соединение. Движение каретки по очередному адресу также запрограммировано, чтобы провод прокладывался по назначенному пути. Очередной провод соответствующей длины высвечивается сигнальной лампой в кассе проводов (рис. 5.5).

При автоматическом монтаже на автоматических линиях производится нарезка проводов, очистка от изоляции и накрутка штырей по заданной программе. В современном производстве необходимость в больших объемах соединений накруткой исчезла, поэтому автоматические линии соединений накруткой постепенно выводятся из производства.

5.2.5. 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 од-

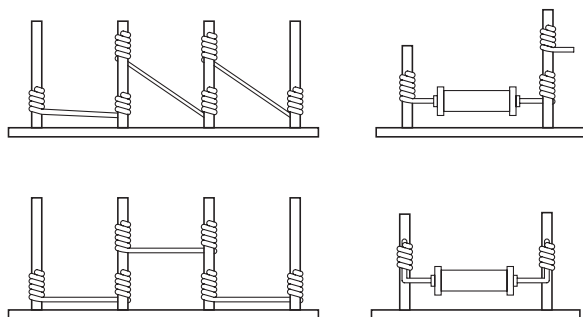


Рис. 5.6. Разнообразие разводки проводов при выполнении соединений накруткой

ном штыре можно также разместить и паяное соединение многожильного провода, и накрученный одножильный провод (рис. 5.6). 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.

5.3. Соединение скручиванием и намоткой

Старым, но успешно использующимся еще поныне способом обеспечения электрического контакта является скручивание концов проводов со снятой изоляцией способами, показанными на рис. 5.7. Это самое простое и самое доступное соединение, не обладающее большой надежностью, но не требующее специальной оснастки для его выполнения.

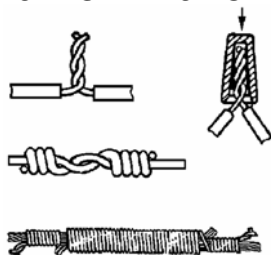


Рис. 5.7. Соединения методом скруток

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

5.4. Винтовое соединение

В соединениях под винт усилие сжатия возникает при затяжке винта. Возникающая в винтовых соединениях запас упругости обеспечивает необхо-

димое 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.

5.5. Зажимное соединение сжатием («термипойнт»)

Этот тип соединений был разработан фирмой Aircraft Marine Products (AMP) в начале 60-х гг. Этим методом провода закрепляют в начале и конце соединения (Termination from point to point). Соединение образуется защемлением провода на штыре специальной клипсой — зажимом (рис. 5.8). 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.

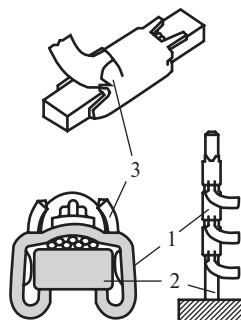


Рис. 5.8. Соединение типа «термипойнт»

5.5.1. Соединительный штырь

Основной материал, используемый для подсоединения проводов, — твердая латунь, фосфористая бронза или луженая бронза; покрытие — никель, золото или олово-свинец. Поперечное сечение штырей — параллелограмм. Радиус скругления боковых сторон штырей на механизме соединения не сказывается.

Штыри рассчитывают на такую длину, чтобы на ней разместилось три соединения.

5.5.2. Провод

Материал провода для термипойнта — медь, покрытая серебром, оловом или кадмием. Провод должен обладать достаточной прочностью, чтобы не разрушиться от давления прижима к штырю.

Для соединений «термипойнт» преимущественно используют много-проводочные провода. Этот метод только для них и существует, так как для одножильных проводов используют метод накрутки.

Концы провода необходимо освободить от изоляции на длине 3–4 мм.

5.5.3. Зажим – клипса

Материал зажима – оловянистая или фосфористая бронза, обладающая хорошей упругостью. В качестве покрытия поверхности зажима используют серебро, олово, сплав олова с никелем. Обычная форма зажима показана на рисунке. Используют два размера зажимов: стандартный – длиной 4,5 мм и миниатюрный – около 3 мм. Зажим можно использовать только один раз.

5.6. 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. 5.9).

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.

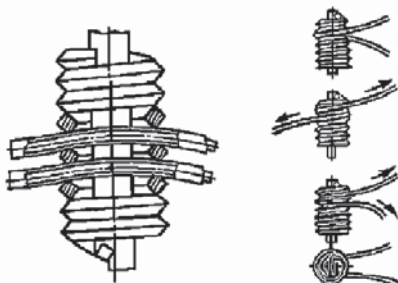


Рис. 5.9. Схема соединения с помощью спиральной пружины

5.7. 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. 5.10, а).

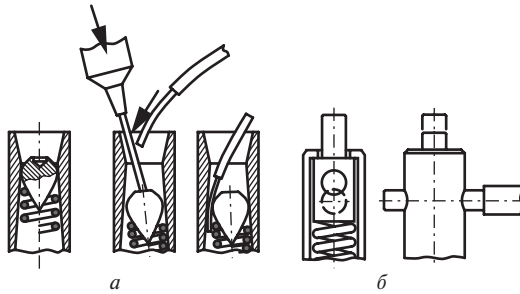


Рис. 5.10. Клеммное соединение: *а* — штекерное соединение; *б* — соединение пружиной сжатия

Другое соединение с помощью пружины сжатия уже давно используют для быстрого закрепления проводов в приборных клеммах (см. рис. 5.10, *б*). Зажим и извлечение провода производятся нажатием кнопки. Деформация провода относительно невелика.

Эти типы соединений относятся к разъёмным соединениям.

5.8. Соединения обжатием

С помощью этого постоянного соединения обычно соединяют провода со всевозможными наконечниками (см. рис. 5.11). В силовоточной аппара-

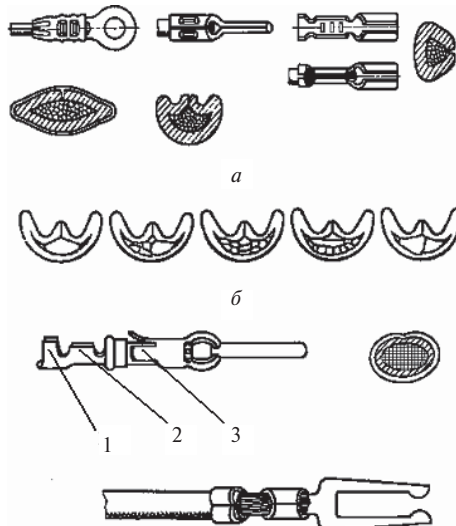


Рис. 5.11. Соединения обжатием: *а* — обжатие проводов в наконечниках; *б* — формы обжатия; 1 — лапка для захвата оболочки; 2 — лапка для захвата и обжатия провода; 3 — фиксирующая пружина (гарпун)

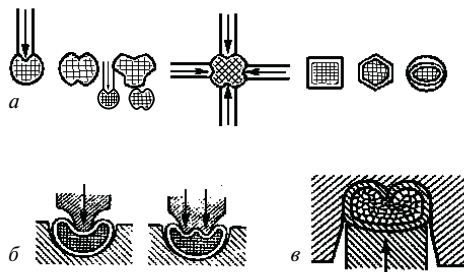


Рис. 5.12. Способы обжимки: *а* — многостороннее обжимки; *б* — обжимки сплющиванием; *в* — двойная обжимка

туре, 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. 5.12). 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.

5.9. Эластичное соединение («зебра»)

Это разъемное 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,

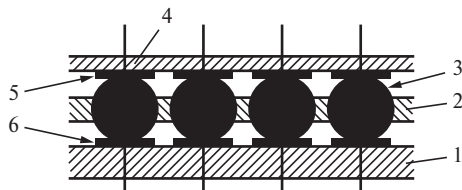


Рис. 5.13. Соединения через токопроводящую резину («зебра»): 1 — монтажная подложка (печатная плата); 2 — держатель токопроводящих элементов; 3 — токопроводящие резиновые элементы; 4 — компонент; 5 — контактное поле компонента; 6 — контактное поле подложки

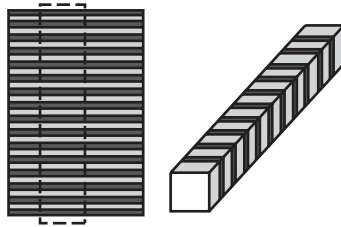


Рис. 5.14. Схема изготовления разъема типа «зебра»: многослойная спрессованная структура из чередования слоев токопроводящей резины и непроводящей (2); брусок, вырезанный из многослойного листа резины, — эластичный разъем «зебра»

выполненные в виде шариков (рис. 5.13) или вырезанные из многослойных пластин чередующихся слоев саженатолненной и непроводящей резины (рис. 5.14). Эластичные контакты особенно хороши, когда нет гарантий ровности рельефа контактирующих поверхностей, своей эластичностью они компенсируют эти неровности.

5.10. Соединения врезанием

Этот вид соединений можно видеть на плоских многопроводных кабелях (рис. 5.15), когда к ним нужно присоединить разъем. Ножи этого разъема при наведении на кабель прорезают изоляцию проводов плоского кабеля и фиксируются на жилах проводов. Естественно, что шаг ножей разъема должен совпадать с шагом проводов плоского кабеля.

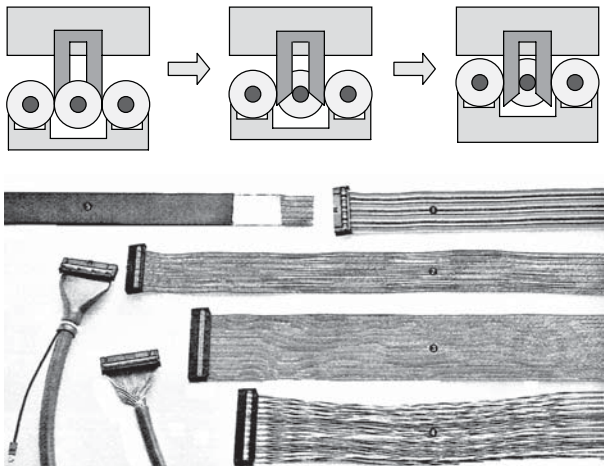


Рис. 5.15. Соединения врезанием разъемов на плоские кабели

5.11. Соединение проводящими пастами

Контактные соединения получают с помощью специальных проводящих паст (контактолов) при их ремонте, замене и монтаже навесных элементов на печатных платах. Способ не получил распространения в серийном производстве ввиду меньшей проводимости этих композиций по сравнению с чистыми металлами и их недостаточной надежностью.

Изготовление электрически проводящих соединений при помощи специальных проводящих паст приобретает все большее значение в электронной промышленности. Проводящие пасты применяют только при ремонте электрических соединений, или при замене компонентов в узле, или там, где невозможен никакой нагрев. В ряде технологий он начал использоваться вместо химической и электрохимической металлизации в макетных работах.

Ряд используемых проводящих компонентов довольно широк (рис. 5.16).

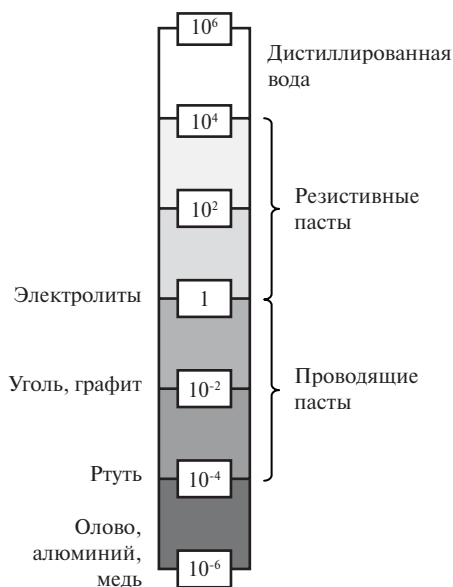


Рис. 5.16. Классификация наполнителей токопроводящих паст по проводимости

Для металлонаполненных составов применяют преимущественно эпоксидные смолы холодного или горячего отверждения, так как они затвердевают без выделения твердого, жидкого или газообразного вещества. Эпоксидные смолы горячего отверждения могут быть готовыми к употреблению (однокомпонентными) или двухкомпонентными. Смолы холодного отверждения всегда готовятся перед употреблением: смола смешивается с отверди-

телем. Время отверждения композиций холодного отверждения при комнатной температуре составляет от 20 до 48 ч, горячего отверждения при температуре от 120 до 200 °С — около 10...20 мин.

Из-за короткого времени отверждения и высокой механической прочности преимущественно применяются проводящие пасты горячего отверждения. Проводимость при этом зависит от вида наполнителя, формы частиц и их величины, а также от количества добавляемой металлической части. Чаше применяются серебро и золото. Размер частиц должен быть как можно меньше из-за гомогенного разделения в слое и опасности осаждения после смешивания. Частицы в форме шара являются предпочтительными.

Распределение размеров частиц также влияет на увеличение количества точечных контактов, как показано на рис. 5.17. Для более плотной упаковки частиц соотношение диаметров больших сфер к меньшим составляет 6:1. Общая доля наполнителя в композиции составляет 65...85% (масс.). Большее количество наполнителя повышает вязкость, ухудшает смачиваемость и затрудняет нанесение пасты. Необходимая добавка отвердителя для застывания смолы не воздействует на соединяемые материалы и металлический порошок и не влияет на контакт из-за экзотермической реакции.

Электрическая проводимость в органических проводящих веществах возникает за счет ионной и электронной проводимости. Для электрически проводящих органических веществ в качестве носителей заряда принимают во внимание только электроны, так как составляющая ионного тока небольшая и, кроме того, ионная проводимость связывается с микроскопическим перемещением материала. В органических соединениях с высокой электрической проводимостью различают две группы:

- низкомолекулярные электрически проводящие вещества (графит, пиррографит и соединения графита), а также низкомолекулярные комплексы, несущие заряд;
- высокомолекулярные электрически проводящие соединения, такие как необработанные полимеры, полимеры, замещенные двумя веществами, а также полимерные комплексы, несущие заряд.

Проблема проводящих органических веществ состоит в создании структуры с достаточной подвижностью носителя заряда. Подвижность электронов складывается в органических веществах из двух отдельных процессов: подвижность электронов в молекуле и переход электронов между молекулами.

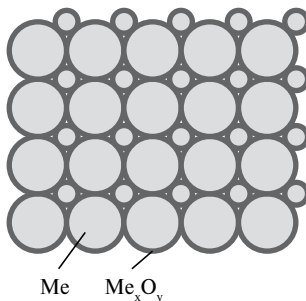


Рис. 5.17. Классификация наполнителей токопроводящих паст по проводимости

Из известной в настоящее время группы органических веществ пока только низкомолекулярные комплексы, несущие заряды, имеют свойства, необходимые для металлических клеевых составов. Они растворяются в доступных растворителях или плавятся при доступных температурах (ниже 200 °С). Достижимое минимальное удельное сопротивление составляет 10^{-2} Ом·см (сравните: у меди удельное сопротивление $1,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см). Поэтому их применение пока еще ограничено.

Чтобы достигнуть более высокой механической прочности, более высокой электрической проводимости, требуется соответствующая предварительная обработка поверхности соединяемой пары материалов. Состав и технологию применения промышленно изготавливаемых токопроводящих паст постоянно оптимизируют в связи с простотой и удобством их использования. Постоянный контроль наполнителя посредством анализа зернистости, химических и физико-химических параметров обеспечивает необходимый состав и постоянные электрические, механические и температурные свойства пасты. При использовании добавляють только отвердитель. Нанесение пасты можно производить как на контактные площадки печатной платы трафаретной печатью, так и на выводы компонента, например погружением. Оптимальная толщина пасты составляет 0,05...0,15 мм. Соединения изделий следует производить непосредственно после нанесения пасты при приложении легкого давления (200 кПа). Затвердевание, основанное на образовании макромолекул, происходит в сушильном шкафу с постоянной температурой или в печи с циркуляцией воздуха.

Так как переходное сопротивление электрически проводящего соединения по меньшей мере на порядок ниже, чем при пайке мягкими припоями, то проводящие пасты до сих пор не получили широкого распространения. Этот способ применяют главным образом при контактировании чипов на толсто пленочную и тонко пленочную монтажную подложку.

Все проводящие пасты, наполненные палладием, серебром или медью хорошо облуживаются и способны образовывать паяные соединения.

В исходном состоянии проводящие пасты представляют собой композиции, в состав которых входят:

- связующее;
- проводящий наполнитель (диспергированные серебро, палладий, медь или др.);
- растворитель, назначение которого довести пасту до нужной вязкости, удовлетворяющей процесс трафаретной печати, т. е. до вязкости, при которой они могут быть продавлены через сетчатый трафарет.

Если пасты наносятся на нагревостойкую подложку, за этим может последовать процесс вжигания. Тогда связующее полностью выгорает, оставляя на подложке металл-наполнитель. Такая технология используется в произ-

водстве толсто пленочных микросхем. В качестве подложек используются керамика, ситаллы, пластины, керамика, спеченная из окиси алюминия и др. В процессе выгорания связующего происходит вжигание металлов в подложку при температурах 750...850 °С с образованием прочной связи с подложкой.

Например, проводниковые пасты на основе серебра-палладия:

Сопротивление квадрата пленки, Ом	0,05
Минимальная ширина проводников и изоляционных зазоров, мм ...	0,2
Толщина пленки, мкм	25
Адгезия к подложке из окиси алюминия, Н/см ²	500

При использовании подложек с органическим связующим, не обладающим большой нагревостойкостью, выжигание связующего невозможно. Возможно лишь его отверждение (полимеризация или пленкообразование за счет испарения растворителя). Такими подложками могут быть стеклоэпоксидные композиции, полиэфирные, гетинаксы, полиимиды. Не исключается использование и нагревостойких подложек. В состав паст входит серебро, способное растворяться в припоях. Для предотвращения этого в состав припоя вводят до 3% серебра (припой ПСрОС 3-58). Нанесенные на подложку и отвержденные токопроводящие пасты способны облуживаться этим припоем и в последующем паяться обычными припоями.

Свойства отверждаемых паст:

Сопротивление квадрата пленки, Ом.....	0,05
Толщина пленки, мкм.....	30
Адгезия к подложке из стеклотекстолита, Н/см ²	100

Проводящие пасты активно используются в так называемой сухой технологии печатных плат вместо химической металлизации отверстий. Проводники по этой технологии отделяются от общего массива фольги фрезированием изоляционных дорожек, а электрическая связь двух сторон платы осуществляется через отверстия, наполненные проводящей пастой.

Ограничение в использовании клеев обусловлено использованием благородных металлов, имеющих минимальное сопротивление контактирования частичек друг с другом. Все другие металлы несут на поверхности окисные пленки, имеющие или полупроводниковую проводимость (медь), или не имеющие проводимости (алюминий).

Тем не менее исследования в области создания проводящих паст, получивших название — контактолы, продвигаются в область использования неблагородных металлов с поиском раскислителей, которые, будучи введенные в связующее, будут предотвращать окисление частичек неблагородных металлов.

5.12. Соединения типа Press-Fit

Появление конструкций многослойных печатных плат с мощными цепями земли и питания, выполненными отдельными металлоемкими слоями, создавало большие проблемы для технологов при их монтаже. Использование метода соединения типа Press-Fit позволяет решить эти проблемы.

5.12.1. Обусловленность появления и применения Press-Fit

Как правило, большое количество слоев в МПП относится именно к платам объединительных панелей. Поскольку они обеспечивают не только большое количество сигнальных связей, но и питание большого количества плат второго уровня, они содержат массивные слои земли и питания, создающих мощные теплоотводы при пайке (рис. 5.18). Всевозможные ухищрения технологов, пытавшихся пропаять отверстия, соединенные с этими слоями, не приводили к существенным успехам: припой поднимался до точки соединения с одним из этих слоев и остывал. Отверстия оказывались непропаянными. Естественное желание избавиться от непропая перегревом панели приводило к разбрызгиванию припоя. И сам по себе перегрев создавал проблемы, связанные с термоустойчивостью материалов плат и пайки. Кроме того, посадка разъемов на плату с малым зазором создавала лабиринт, из которого трудно вымыть флюс и удалить брызги припоя. В балтийских странах пошли даже на то, чтобы в качестве флюса при пайке панелей использовать спиртовой раствор янтаря (он подобен канифоли, как смесь органических кислот, но его остатки — хороший диэлектрик). Но и в этом случае объединительные панели недопустимо часто становились источником отказов и возгорания электронной аппаратуры.

Нужно еще учесть, что хвостовики разъемов при пайке вынуждены защищать от припоя, если предусматривается их использование для последую-

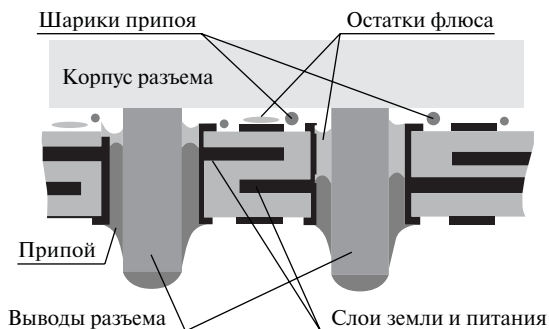


Рис. 5.18. Трудности пайки объединительных панелей

шей иерархии соединений, например накруткой. Поэтому пайка волной припоя хотя и возможна, но сложна и трудоемка из-за дополнительных операций нанесения защитных покрытий и последующего их удаления. Мало того, большая длина хвостовиков вынуждает поднимать волну, и в этой ситуации трудно обеспечить ее равномерность. Ручная пайка паяльником двухрядных разъемов еще допустима, но для трехрядных вообще невозможна: добраться паяльником в пространство между рядами (шаг контактов — 2,54 мм) хвостовиков очень трудно.

Одним словом, пайка объединительных панелей создавала неразрешимые проблемы.

В связи с этим попытки заменить паяные соединения непаяными с использованием методов впрессовывания контактных штырей в металлизированные отверстия предпринимались давно, но безуспешно. Положительным результатам препятствовало явление релаксации: материал основания платы «плывет», ослабляя первоначально тугое соединение штырей с отверстиями. И через некоторое время материал расступался, и штыри выпадали из отверстий. Мало того, большие производственные погрешности воспроизведения размеров элементов сочленения штырей и отверстий приводили к тому, что часть соединений изначально не получали тугой посадки.

Положительный эффект наступил, когда научились на контактном штыре выполнять специальную пуклевку, создающую упругую деформацию при впрессовывании штыря в отверстие (рис. 5.19). Упругая деформация пуклевки компенсировала релаксацию материалов и погрешности размеров отверстий плат. Формы таких пуклевок разнообразны (рис. 5.20), но все они имеют широкую зону упругой деформации и поверхность сопряжения, достаточную для электрического и механического контакта штыря с отверстием.

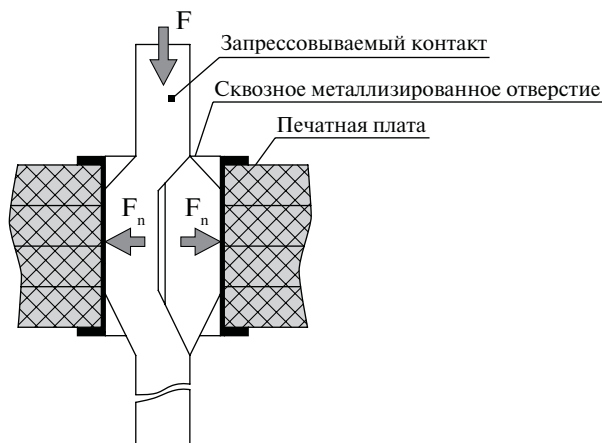


Рис. 5.19. Принцип соединения типа Press-Fit

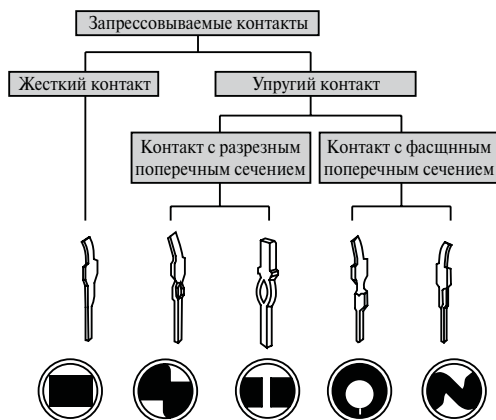


Рис. 5.20. Классификация соединений «Press-Fit»

Соединения этого типа получили распространенное название «Press-Fit», что в переводе на русский означает «прессовое соединение». Мы бы по-русски сказали более точно: «соединение, выполняемое впрессовыванием пуклевки контактного штыря в металлизированное отверстие». В первой русской обзорной публикации на эту тему [1] определение «Press-Fit» было дано в такой, более точной и пространной, интерпретации: «*Непаяное соединение, выполняемое запрессовкой — это получаемое запрессовкой соединение между особым образом спрофилированным контактом и сквозным металлизированным отверстием в печатной плате. Оно принадлежит к категории неразъемных соединений, образующихся за счет холодной деформации фрагментов соединяемых элементов и существующих в самых разнообразных вариациях*». Далее там же: «Соединения данного класса пользуются высокой популярностью в электрической и электронной областях промышленности всего мира благодаря следующим преимуществам:

- высокая механическая прочность на растяжение;
- высокая устойчивость к вибрационным нагрузкам;
- отсутствие необходимости в нагреве для образования соединения (в ряде случаев данное обстоятельство играет решающую роль);
- коррозионная стойкость за счет герметичности контакта;
- экономичность;
- простота ремонта (благодаря отсутствию нагрева);
- гигиеничность производства (благодаря отсутствию флюсов и припоев);
- высокая надежность».

Интересно, что факторы, мешающие пайке панелей (большая толщина, массивные слои земли и питания), здесь играют положительную роль: чем толще плата и больше в ней металла, тем прочнее запрессовка контакта, больше поверхность контактирования, лучше надежность соединений.

5.12.2. Элементы Press-Fit

5.12.2.1. Контактные штыри

Запрессовываемый контактный штырь состоит из части для сочленения с ответным соединителем, запрессовываемой части — пуклевки, заходной части и части, предназначенной или для монтажа накруткой, или для сочленения с другим соединителем (рис. 5.21).

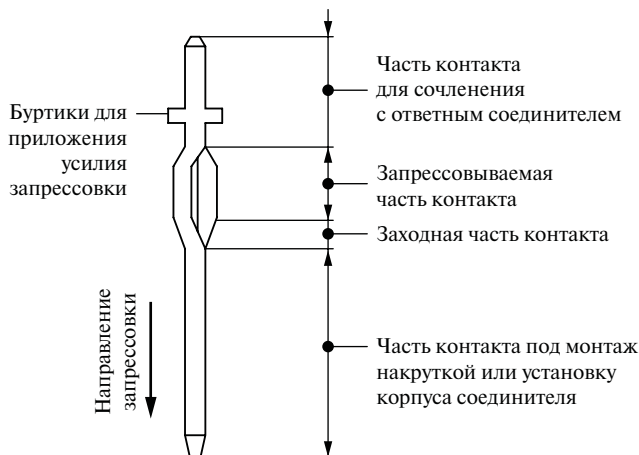


Рис. 5.21. Элементы конструкции контактного штыря

Часть контакта для сочленения с ответным соединителем может иметь или форму штыря (в случае если ответным соединителем является розетка), или форму лиры (в случае если ответным соединителем является вилка). В случае если контакт в этой части имеет форму штыря, усилие запрессовки прилагается к создаваемым именно с этой целью буртикам. Иначе, если контакт имеет лирообразное окончание, усилие запрессовки прилагается на дно лиры как на самый удобный и самый прочный для этих целей элемент конструкции. Как правило, эта часть встраивается в корпус соединителя, и именно она отвечает за удержание контакта в соединителе.

Запрессовываемая часть контакта выполняет основную роль в образовании соединения. Ее конфигурация (в поперечном сечении) может иметь разнообразные формы, как показано на рис. 5.22. Главная задача, которую должна выполнять эта часть контакта, — создание давления на боковые стенки сквозного металлизированного отверстия, устойчиво удерживающего штырь в отверстии в напряженном состоянии. Размер поперечного сечения контакта в запрессовываемой части должен соответствовать диаметру отверстия, на который этот контакт рассчитан. Длина запрессовываемой части контакта должна соответствовать толщине печатной платы, в которую он устанавливается.

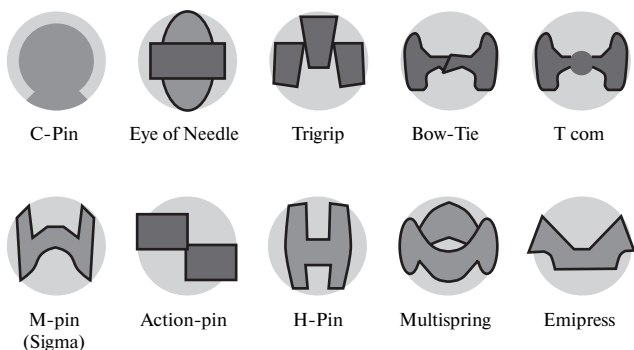


Рис. 5.22. Разнообразие форм пуклевок контактных штырей

Заходная часть контакта играет существенную роль при запрессовке. Ее форма позволяет ориентировать контакт надлежащим образом при его входе в отверстие и обеспечивать плавное обжатие пуклевок штыря металлизированным отверстием.

Жесткость пуклевок должна быть ограничена, иначе внедрение контакта может разрезать металлизацию отверстия.

Часть контакта под монтаж накруткой является необязательным конструктивным элементом, но часто используемым.

5.12.2.2. Сквозные металлизированные отверстия

Сквозные металлизированные отверстия имеют структуру, представленную на рис. 5.23, и выполняются в печатных платах номинальной толщиной 1,5–6,4 мм, изготавливаемых из стеклоэпоксида типов G10, G11, FR5 и EP.

Требуемая толщина меди в сквозных металлизированных отверстиях под запрессовку больше, чем под пайку, а допуски на эту толщину более жесткие. Однако слишком толстое медное покрытие может привести к излишнему увеличению усилий запрессовки.

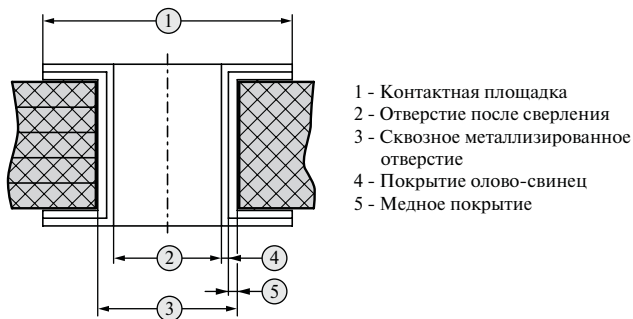


Рис. 5.23. Структура сквозного металлизированного отверстия

Оловянно-свинцовое покрытие не должно быть слишком толстым, так как в этом случае его частицы будут выдавливаться из отверстия запрессовываемым контактом и становиться источником опасности замыкания.

Оловянно-свинцовое покрытие может и не наноситься. В этом случае в отверстии будет чисто медное покрытие. Однако, как правило, оно присутствует, играя роль металлорезиста при травлении рисунка, а при запрессовке — «смазочного» покрытия.

Технология запрессовки требовательна к конечному диаметру металлизированного отверстия в печатной плате в большей мере, чем для процессов пайки. Она вынуждает назначать и соблюдать определенные допуски на всю структуру отверстия. Это касается и диаметра отверстия после сверления (в первую очередь), и толщины медного покрытия (во вторую), и толщины оловянно-свинцового покрытия (в третью) — т. е. всех размеров, формирующих конечный диаметр отверстия.

При формировании отверстия под запрессовку его диаметр после сверления должен быть больше, чем при получении металлизированного отверстия под пайку. Диаметр сверления наиболее ответственен за усилие запрессовки и выпрессовки (демонтажа) контактных штырей.

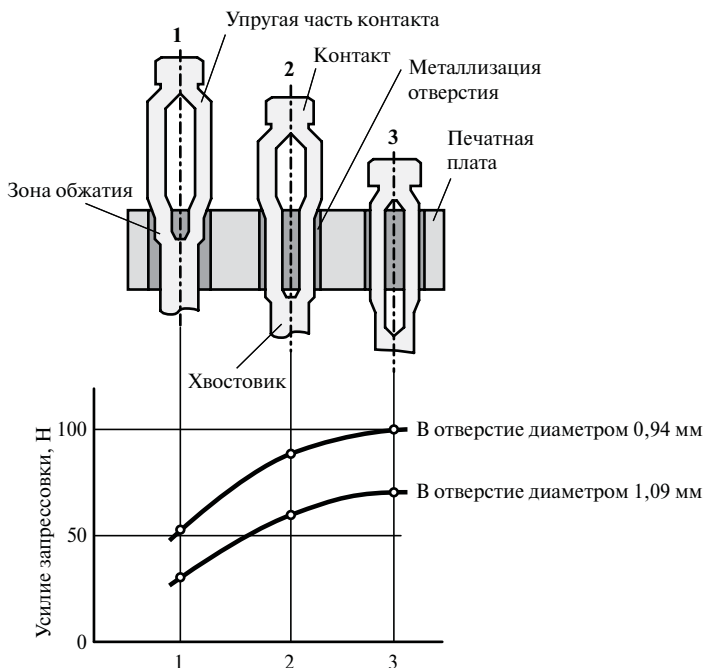


Рис. 5.24. Возрастание усилия запрессовки штыря по мере его внедрения в отверстие

5.12.2.3. Механизм образования соединения

Запрессовка контакта начинается с подачи на его опорные поверхности усилия запрессовки, под воздействием которого предварительно установленный контакт начинает входить в сквозное металлизированное отверстие печатной платы. Сначала в соприкосновение с отверстием входит заходная часть, внедряющаяся в поверхностный слой покрытия отверстия, начинается формирование зоны электрического контакта за счет встречной упругой деформации запрессовываемой части контакта и боковых стенок отверстия. В ходе продолжающегося воздействия усилия запрессовки в отверстие внедряется вся запрессовываемая часть, которая благодаря ее деформации адаптируется к диаметру отверстия, не повреждая его. Таким образом, обеспечивается плавное равномерное возрастание давления на стенки отверстия, а в зоне контакта формируется соединение холодной сваркой (рис. 5.24). Упругая пуклевка контакта при скольжении по стенкам отверстия самостоятельно встает в вертикальное положение и образует плотное соединение со сквозным металлизированным отверстием. Плотность электрического контакта обеспечивается взаимными усилиями: со стороны штыря и со стороны отверстия. Наплыв поверхностного слоя покрытия боковых стенок отверстия на пуклевку штыря запирает штырь в отверстии (рис. 5.25).

Наплыв поверхностного слоя покрытия, являющийся следствием остаточной упругой деформации и запирающий контакт в отверстии

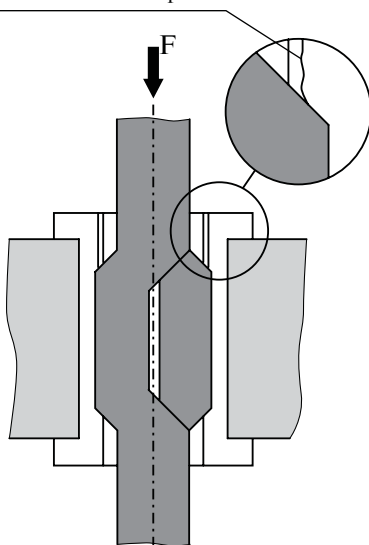


Рис. 5.25. Заклинивание пуклевки в отверстии

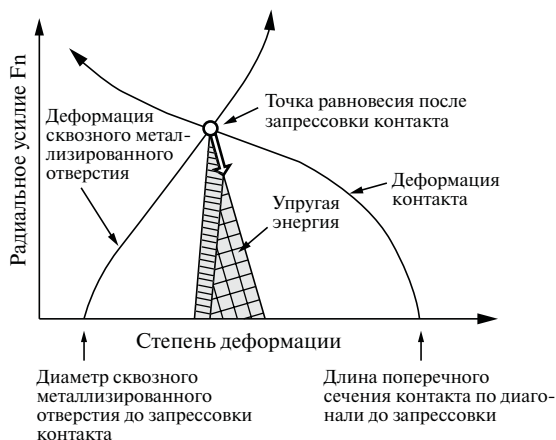


Рис. 5.26. Взаимозависимость степени деформации сочленяемых элементов и усилия запрессовки

Степень деформации элементов сочленения определяется соотношением диаметра металлизированного отверстия и размера пуклевки контактного штыря и соотношением их жесткости. По усилию запрессовки штыря, по ее величине можно судить о степени деформации пуклевки. Графически это можно представить диаграммой, изображенной на рис. 5.26.

Для подбора оборудования для реализации технологии Press-Fit нужно представить, что усилие запрессовки разъема со 160 контактами составляет 3,2 т. Основными компонентами комплекта для запрессовки одиночных контактов и многостыревых соединителей с запрессовываемыми контактами являются пуансон, передающий давление со штока пресса на соответствующие опорные поверхности контакта, и подплатная матрица, обеспечивающая дополнительную жесткость платы (рис. 5.27), чтобы она не прогибалась под воздействием усилия запрессовки.

Технологический процесс запрессовки соединителей можно представить в виде следующей последовательности действий [1]:

1. Проверка комплектности соединителей и их соответствие спецификации.
2. Установка и фиксация пуансона на штоке, а подплатной матрицы — на станине пресса.
3. Установка на технологическую плату технологического соединителя.
4. Визуальная проверка положения соединителя на плате согласно чертежу.
5. Изъятие технологической платы из контейнера (с наживленным технологическим соединителем), установка платы на направляющие пресса с предварительной их настройкой и фиксацией по габаритам платы и настройка высоты штока пресса по технологическому соединителю согласно инструкциям.
6. Опускание штока пресса до входа пуансона в контакт с технологическим соединителем и выполнение пробной запрессовки.

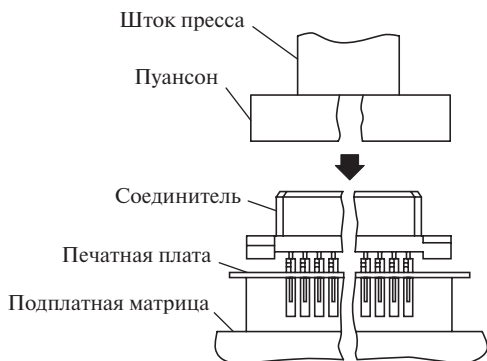


Рис. 5.27. Оснастка, используемая для запрессовки контактов разъемов в платы

7. Снятие платы с направляющих и помещение ее обратно в контейнер.
8. Контроль качества выполненного соединения.
9. Установка на штатную плату соединителя согласно чертежу.
10. Визуальная проверка положения соединителя на плате согласно чертежу.
11. Изъятие платы из контейнера и установка ее на направляющие пресса.
12. Визуальная проверка плотности прилегания платы к матрице и попадания всех выводов в соответствующие пазы/отверстия подплатной матрицы.
13. Опускание штока пресса до входа пуансона в контакт с соединителем и выполнение запрессовки.
14. Перемещение следующего соединителя под шток пресса.
15. Повтор переходов 13–14 в отношении всех остальных соединителей.
16. Снятие платы с направляющих пресса и помещение ее обратно в контейнер.
17. Контроль качества запрессовки.

Рекомендуется выполнять запрессовку соединителей на платы после установки и пайки компонентов. Однако практика показывает, что такой подход не всегда приемлем. При высоком уровне заселенности платы компонентами может оказаться недостаточно пространства для размещения подплатной матрицы, выполняющей роль опоры. В таких ситуациях возникает желание запрессовки контактов разъемов до установки компонентов. Однако при пайке после запрессовки разъемов платы нагреваются до температур, больших, чем температура стеклования связующего материала платы. Материал основания «плывет», и пресовое соединение ослабляется. В данной ситуации встает проблема взаимоприемлемого компромисса и необходимости оценки возможной степени влияния пайки соседних компонентов на качество уже запрессованных соединителей. Конечно, при ручной пайке таких проблем нет, поскольку в этом случае нагрев материала в зоне запрессовки контактов отсутствует.

5.12.3. Техника межсоединений на основе технологий Press-Fit

Не загрязненные пайкой штыри Press-Fit успешно используются как вилки для сочленения с розетками разъемов, а их хвостовики — для соединений накруткой (рис. 5.28).

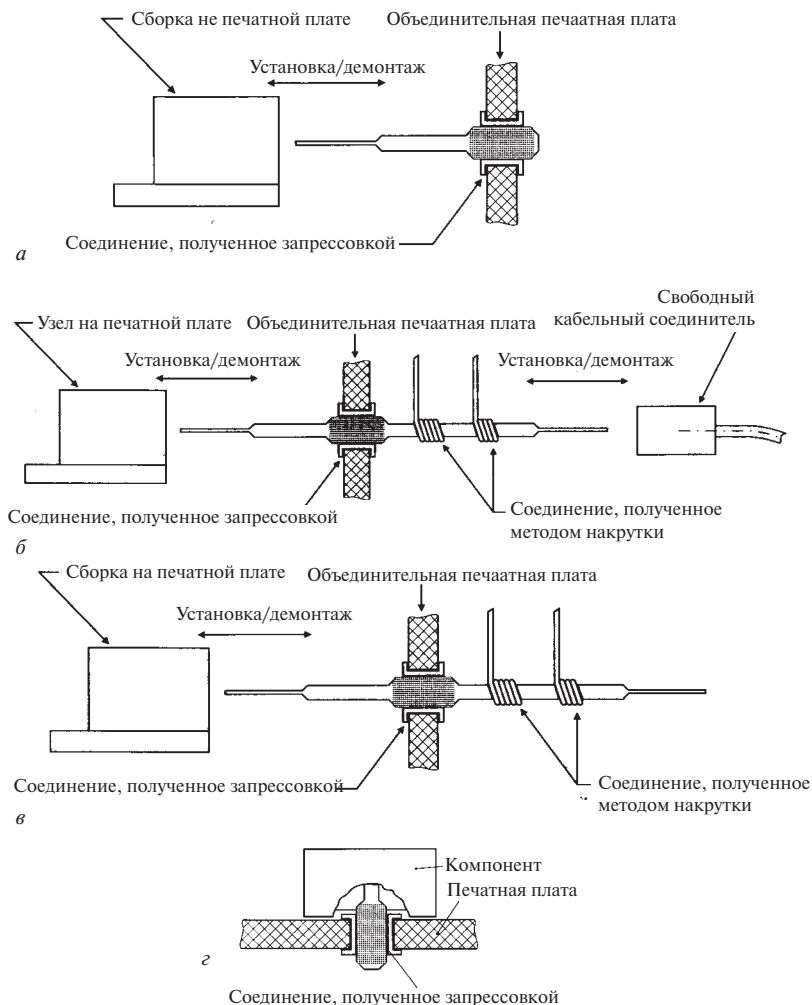


Рис. 5.28. Разнообразие использования штырей Press-Fit для сочленения с разъемами и с накруткой: *а* — применение; *б* — с накруткой (способ 1); *в* — с накруткой (способ 2); *г* — с запрессовкой

5.12.4. Прочность соединений Press-Fit

Очень важны для техники Press-Fit выдерживать в узком допуске диаметр металлизированных отверстий. Это не просто, так как в этот допуск нужно уложить и допуски на диаметр сверла, и изменение диаметра отверстий по мере затупления сверл, и разброс толщин металлизации от края платы к ее середине. В конечном итоге это сказывается на усилии внедрения контактных штырей в отверстия (рис. 5.29), и можно полагать, что таким же образом это сказывается и на их удержании в отверстиях [2].

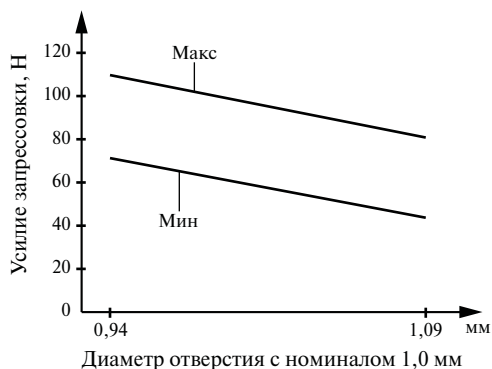


Рис. 5.29 Изменение усилия запрессовки в поле допусков на диаметр сверла при номинале 1 мм

На прочность удержания контактного штыря в отверстии влияет также характер покрытия по меди в отверстиях (рис. 5.30).

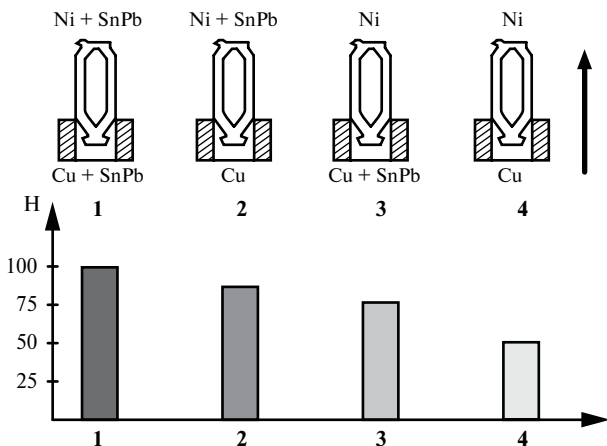


Рис. 5.30 Усилия удержания штыря в отверстии в зависимости от покрытий

5.12.5. Проблемы технологии запрессовки

Несмотря на достаточно высокую степень освоения технологии запрессовки, в данной области существует масса проблем, которые до сих пор не решены. Например, до сих пор стоит вопрос о том, какие именно элементы конструкции платы принимают на себя напряженное состояние запрессованного контакта. Ими может быть металлизация отверстия. Но ее толщина всего 25 мкм. К тому же доля упругости меди составляет всего 0,5% от общей деформации. Более мощным элементом тугой посадки может быть стенка отверстия в стеклоэпоксидной композиции основания платы. Все это очень важно для назначения требований к геометрии отверстия: до (после сверления) или после металлизации. Техника Press-Fit все еще требует исследований:

- напряженного состояния компонентов соединения от температуры для оценки влияния нагрева, возникающего при пайке после запрессовки контактов;
- степени влияния скорости запрессовки на характеристики и качество соединения;
- длительности напряженного состояния в соединении в условиях релаксации материала основания и оценки надежности системы в экстремальных условиях эксплуатации, что особенно важно для установления целесообразности применения технологии Press-Fit в изделиях ответственного назначения (хотя за рубежом этот вопрос уже решен в положительную сторону и даже разработаны военные стандарты на соединения данного типа: MIL-C-28859 и MIL-C-288598);
- методов и критериев оценки качества соединений, получаемых запрессовкой.

К сожалению, сегодня оценка качества соединений Press-Fit выполняется лишь по микрошлифам, снимаемым с образцов-свидетелей, что, естественно, приводит к росту затрат на производство ответственных изделий электронной техники. Параллельно с этим за рубежом широко применяется метод конечных элементов, позволяющий еще до запрессовки оценить параметры соединения, подобрать оптимальные условия его получения и на выходе получить результаты, отличающиеся достаточно высокой достоверностью. Однако и такой подход все же не дает возможности определить реальную картину прессового соединения.

5.13. Заключение

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 дости-

гаться 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 перемешиваются. 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 микросварки, 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 ремонтопригодностью.

Непаяные 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 непаяных методов соединений, как показано во введении, лучше 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), перемненную часть соединений — накруткой;

в) для соединения панелей с лицевыми панелями прибора — соединения гибкими проводами с использованием метода «термипойнт»;

г) силовые провода и внешние соединения блоков питания с поперечным сечением больше 1,5 мм² целесообразно монтировать методом обжатия хвостовиков клемм с последующим их привинчиванием к силовым контактным элементам;

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.

Опрометчиво думать, что описанные в этой главе методы непаяных соединений — последнее слово техники межсоединений. Постоянное движение к микроминиатюризации обуславливает поиск новых методов, сочетающихся с уменьшающимися размерами электронных изделий.

Литература

1. Плотников Ф. Непаяные соединения, выполняемые запрессовкой — новый класс соединений на российском рынке электронной техники. Компоненты и технологии, 2001, №1.
2. Коннекторы Molex DIN41612. Технология запрессовки. Компоненты и технологии, 2005, №2.

ГЛАВА 6

ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ И МОНТАЖА ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Современные технологии сборки и монтажа основаны преимущественно на принципах установки и пайки компонентов на поверхность (рис. 6.1, *а*). Теперь все понимают, о чем идет речь, когда 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. 6.1, *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. 6.2) с разницей вплоть до 90%.

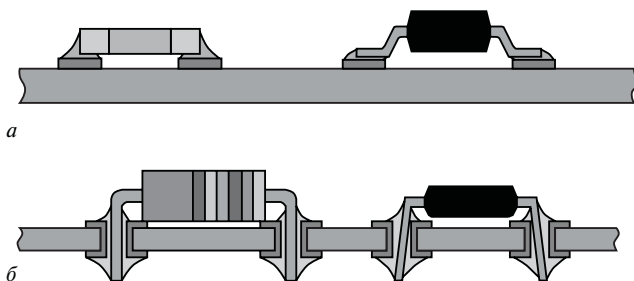


Рис. 6.1. Схемы установки и монтажа компонентов на печатные платы: *а* — поверхностный монтаж (SMT-монтаж); *б* — монтаж выводов в отверстия (PTH-монтаж)

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. Естественно при этом выборе использовать известные критерии оптимизации: максимальная производительность, минимальные капитальные вложения, возможность быстрой перенастройки линии при переходе с одного типа модуля на другой, способность реализации модулей

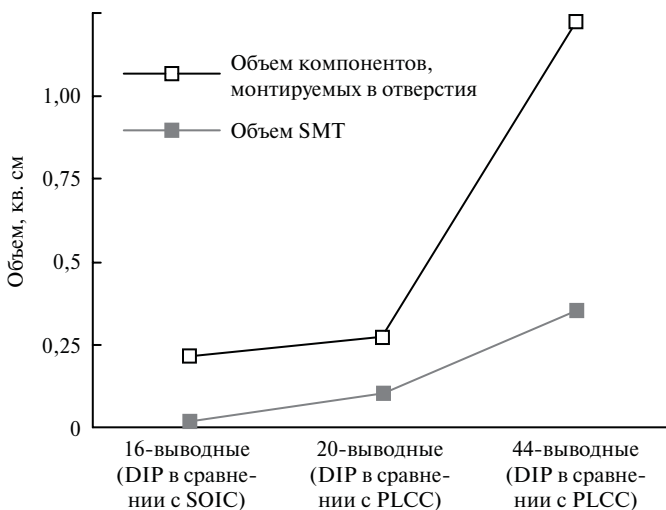


Рис. 6.2. Сравнение объемов SMT и PTH-компонентов [1]

с разнообразными схемами сборки, технологическое обеспечение качества и надежности.

6.1. Поверхностно монтируемые изделия (SMD-компоненты)

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

6.1.1. Чип-резисторы

Чип-резистор — наиболее простой SMD-компонент (рис. 6.3). 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,

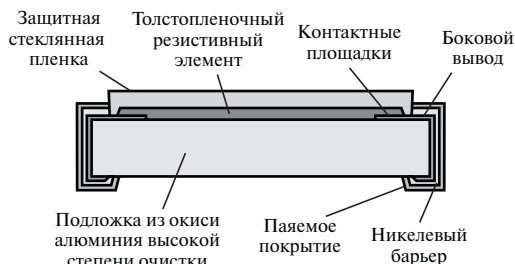


Рис. 6.3. Чип-резистор

такие компоненты нашли применение в слуховых аппаратах и мобильных телефонах.

6.1.2. 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. 6.4. 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.

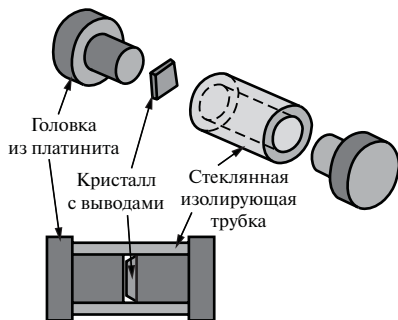


Рис. 6.4. Резистор MELF

6.1.3. 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. 6.5). Требуемая емкость конденсатора обеспечивается соответствующим количеством слоев. Конструкция торцевых выводов

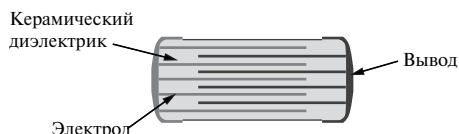


Рис. 6.5. Конструкция многослойного керамического чип-конденсатора

подобна той, что и в чип-резисторах. Чип-конденсаторы группируют по удельной емкости и термостабильности:

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

6.1.4. Чип-индукторы

В чип-индуктивностях используется керамический или ферритовый стержень с вертикальной или горизонтальной обмоткой из тонкой медной проволоки в эмаливой изоляции (рис. 6.6). Чип-индуктивность обычно герметизируется эпоксидной смолой.

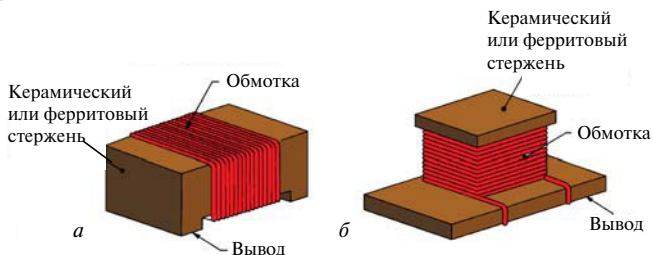


Рис. 6.6. Чип-индукторы: а – с вертикальной обмоткой; б – с горизонтальной обмоткой

6.1.5. Дискретные полупроводниковые компоненты

Поверхностно-монтируемые дискретные полупроводниковые компоненты, такие, как диоды или транзисторы, монтируются в корпусах типа SOT-23 и SOT-143 (для маломощных диодов и сборок из двух диодов) или в корпусах SOT-89 (для силовых устройств). В корпусе такого типа центральный вывод проходит под кристаллом для улучшения рассеяния тепла.

6.1.6. Интегральные схемы

Корпуса интегральных микросхем имеют самое большое разнообразие. Наиболее часто используемые типы корпусов:

- малогабаритный корпус (SOIC),
- тонкий корпус с уменьшенным расстоянием между выводами (TSOP),
- пластиковый выводной кристаллодержатель (PLCC),
- безвыводной керамический кристаллодержатель (LCCC),
- квадратный плоский корпус с выводами с четырех сторон (QFP),
- корпус с матричным расположением шариковых выводов (BGA).

Формы паяных соединений микросхем в различных корпусах могут быть представлены пятью главными видами, как показано на рис. 6.7.

Выводы, напоминающие формой крыло чайки (рис. 6.7, *а*), — наиболее распространенная форма выводов, особенно в случае применения изделий с малым шагом выводов. Однако эти выводы подвержены повреждениям при сборке.

Корпуса с J-выводами (рис. 6.7, *б*) более удобны в производстве. Но это преимущество забывается из-за сложности ремонта.

I-выводы (рис. 6.7, *в*) более просты в изготовлении, чем выводы типа «крыло чайки» и J-выводы. Они не так распространены, как выводы типа «крыло чайки», из-за подозрений по поводу надежности паяных соединений «встык».

На рис. 6.7, *г* показана конфигурация паяных соединений безвыводных керамических кристаллодержателей микросхем.

По мере миниатюризации приходится вновь возвращаться к проблемам надежности соединений, особенно из-за несовпадения температурных коэффициентов расширения материалов. Кроме того, возникают дополнительные проблемы удаления остатков флюса из-под компонентов из-за малого зазора между компонентами и подложками.

Паяное соединение компонентов BGA показано на рис. 6.7, *д*. Здесь шариковые выводы с высокой температурой плавления, расположенные под пластиковым корпусом, припаиваются к контактным площадкам платы оплавлением паяльной пасты. Плотность матричной системы выводов BGA конкурирует с периферийной системой вплоть до шага выводов 0,3 мм, тем более — с шагом 0,4 мм. Поэтому микросхемы в корпусах типа BGA, если пре-

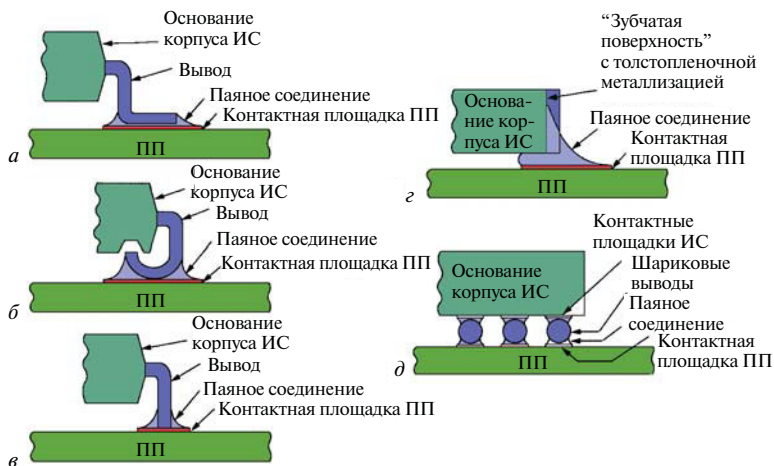


Рис. 6.7. Конфигурация выводов корпусов ИС: *а* — «крыло чайки»; *б* — J-вывод; *в* — I-вывод; *г* — безвыводная металлизация; *д* — шариковый вывод

одолеть все технологические трудности их монтажа, составляют им серьезную альтернативу.

6.2. Разнообразие типов компоновок

Все разнообразие конструкций электронных модулей сводится к шести типам сборки. Каждому типу соответствует определенная последовательность операций, реализуемая технологическими линиями. Такое разнообразие обусловлено тем, что не всегда разработчик модуля считается с необходимостью оптимизации сборки с целью минимизации числа операций и уменьшения производственных издержек. Но в ряде случаев это оправдано необходимостью максимальной плотности компоновки электронных изделий, таких как цифровые камеры, мобильные телефоны, миниатюрные телевизионные приемники и т.д., там где миниатюризация — главная задача проектирования.

Варианты компоновок поверхностно монтируемых компонентов в сочетании с неизбежной необходимостью монтажа крупных компонентов с выводами для монтажа в отверстия можно представить следующим разнообразием вариантов.

6.2.1. Классификация типов сборок

Классифицировать типы сборок можно по их конструкциям или по технологическому маршруту их реализации. Но поскольку ознакомление с объектом производства начинается с анализа проекта, приведем классификацию типов сборок с позиций размещения компонентов и их выводов на монтажной подложке (печатной плате).

6.2.1.1. Тип 1. Установка компонентов с одной стороны

Тип 1А. Компоненты с выводами в отверстия (PTH-компоненты) установлены на одной стороне монтажного основания (рис. 6.8).

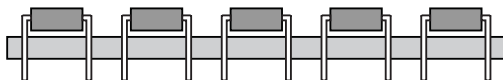


Рис. 6.8. Компоновка типа 1А

Тип 1В. Поверхностно монтируемые компоненты (SMD-компоненты) установлены на одной стороне монтажного основания (рис. 6.9).



Рис. 6.9. Компоновка типа 1В

Тип 1С. На одной стороне подложки установлены и SMD-, и PTH- компоненты (рис. 6.10)

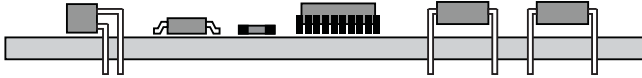


Рис. 6.10. Компоновка типа 1С

6.2.1.2. Тип 2. Установка компонентов с двух сторон

Тип 2А. Двусторонний монтаж SMD-компонентов (рис. 6.11).



Рис. 6.11. Компоновка типа 2А

Примером компоновки типа 2А может служить конструкция с размещением SMD-компонентов на двух сторонах, показанная на рис. 6.12. Размещение больших компонентов, типа PLCCS с обеих сторон увеличивает издержки производства, потому что компоненты нижней стороны должны устанавливаться на клей. На рис. 6.13. показан пример более оптимальной конструкции с размещением SMD-компонентов на двух сторонах, отличающейся тем, что на одной стороне размещены тяжелые компоненты (микросхемы), на нижней — легкие чип-компоненты. Это наиболее распространенная SMT-компоновка.

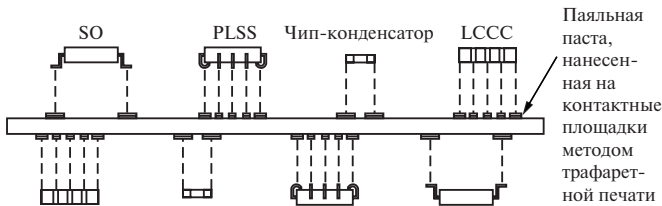


Рис. 6.12. Схема конструкции электронного модуля с двусторонним размещением SMD-компонентов тяжелого типа (микросхем)

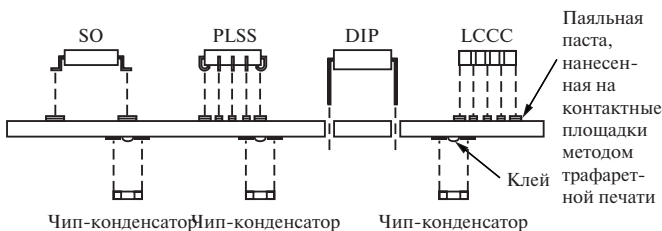


Рис. 6.13. Оптимизированная двусторонняя компоновка SMD-компонентов

Тип 2В. На верхней стороне устанавливаются РТН-компоненты, на нижней – SMD-компоненты (рис. 6.14).

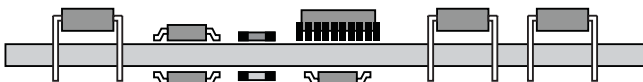


Рис. 6.14. Двусторонняя компоновка: РТН-компоненты на верхней стороне, на нижней – SMD-компоненты

Тип 2С. На верхней стороне устанавливаются РТН-компоненты, на нижней – легкие SMD-компоненты (рис. 6.15). Схема такой компоновки показана на рис. 6.16. Такая компоновка реализуется с минимальными издержками пайкой за один прием волной припоя.

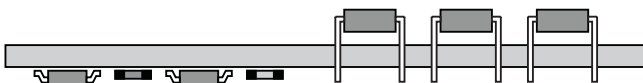


Рис. 6.15. Двусторонняя компоновка типа 2С, где на верхней стороне устанавливаются РТН-компоненты, на нижней – легкие SMD-компоненты

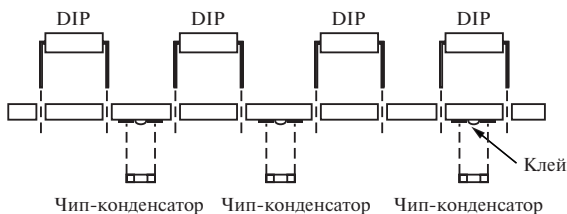


Рис. 6.16. Пример компоновки типа 2С

Тип 2D. Смешанная неупорядоченная сборка (рис. 6.17)

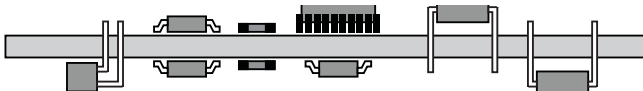


Рис. 6.17. Смешанная компоновка, при которой на обеих сторонах подложки устанавливаются и SMD-, и РТН-компоненты

6.2.3. Маршруты сборки и монтажа

Компоненты монтируются на плату оплавлением паяльной пасты или пайкой волной припоя с закреплением (при необходимости) компонентов клеем. Для электронных модулей на гибких основаниях или в изделиях с термочувствительными компонентами изредка используются токопроводящие клеи или пасты.

Выбор технологического маршрута сборки и монтажа зависит от сочетания SMD- и РТН-компонентов и размещения их на одной или двух сторонах

монтажного основания. Вообще говоря, техпроцессы сборки состоят из разнообразия последовательности операций:

- нанесение паяльной пасты;
- нанесение клея;
- установка SMD-компонентов;
- отверждение клея;
- установка PTH-компонентов;
- пайка оплавлением;
- пайка волной припоя.

В этот перечень преднамеренно не включены операции тестирования, оптической инспекции и отмывки с последующей лакировкой, так как это относится к отдельной теме обсуждения вопросов обеспечения качества, надежности и назначения электронных изделий.

6.2.3.1. Последовательность сборки типа 1А:

- установка PTH-компонентов;
- пайка волной припоя.

6.2.3.2. Последовательность сборки типа 1В:

- нанесение паяльной пасты;
- установка SMD-компонентов;
- пайка оплавлением.

6.2.3.3. Последовательность сборки типа 1С:

- нанесение паяльной пасты;
- установка SMD-компонентов;
- пайка оплавлением;
- установка PTH-компонентов;
- пайка волной припоя.

При пайке волной припоя PTH-компонентов паяные соединения SMD-компонентов на верхней стороне платы могут снова расплавиться. И независимо от того, что конвейер установки пайки волной припоя имеет наклон, SMD-компоненты удержатся на местах за счет поверхностного натяжения паек.

6.2.3.4. Последовательность сборки типа 2А:

- нанесение паяльной пасты на нижнюю сторону платы;
- установка SMD-компонентов на нижнюю сторону платы;
- пайка оплавлением компонентов на нижней стороне платы;
- переворот платы;
- нанесение паяльной пасты на верхнюю сторону платы;
- установка SMD-компонентов на верхнюю сторону платы;

- пайка оплавлением компонентов на верхней стороне платы.

Поверхностного натяжения припоя, в общем, достаточно для удержания компонентов на нижней стороне платы во время второй пайки оплавлением компонентов верхней стороны.

По этой схеме плату с компонентами приходится нагревать два раза из-за того, что клеящей способности паяльной пасты в момент ее перехода в расплавленное состояние недостаточно для удержания компонентов на нижней стороне. Поэтому если компоненты нижней стороны ставить на клей, то пайку можно производить за один нагрев. Если нижняя сторона платы имеет тяжелые компоненты, для которых поверхностного натяжения расплава припоя недостаточно для удержания этих компонентов, тем более необходимо использовать их приклейку. Тогда схема сборки получает два варианта.

В зависимости от химического состава флюса может потребоваться или не потребоваться отмывка. В первом случае отмывка может производиться после первого или второго прохода. Практическое правило гласит, что, чем большему температурному воздействию подвергались флюсы, тем более сложной будет отмывка. Многие производители успешно внедрили однократную отмывку.

Вариант первый для сборки типа 2А:

- нанесение паяльной пасты на верхнюю сторону платы;
- установка SMD-компонентов на верхнюю сторону платы;
- переворот платы;
- нанесение клея на нижнюю сторону платы;
- нанесение паяльной пасты на нижнюю сторону платы;
- установка SMD-компонентов на нижнюю сторону платы;
- отверждение клея;
- пайка оплавлением обеих сторон.

Вариант второй для сборки типа 2А:

- нанесение паяльной пасты на верхнюю сторону платы;
- установка SMD-компонентов на верхнюю сторону платы;
- пайка оплавлением компонентов на верхней стороне платы.
- переворот платы;
- нанесение клея на нижнюю сторону платы;
- нанесение паяльной пасты на нижнюю сторону платы;
- установка SMD-компонентов на нижнюю сторону платы;
- отверждение клея;
- пайка оплавлением или волной припоя с нижней стороны.

6.2.3.5. Последовательность сборки типа 2В:

- нанесение паяльной пасты на верхнюю сторону платы;
- установка SMD-компонентов на верхнюю сторону платы;
- пайка оплавлением верхней стороны платы;
- нанесение клея на нижнюю сторону платы;

- установка SMD-компонентов на нижнюю сторону платы;
- отверждение клея;
- установка PTH-компонентов на верхнюю сторону платы;
- пайка волной припоя SMD- и PTH-компонентов на нижней стороне платы.

6.2.3.6. Последовательность сборки типа 2C:

- нанесение клея на нижнюю сторону платы;
- установка SMD-компонентов на нижнюю сторону платы;
- отверждение клея;
- установка PTH-компонентов на верхнюю сторону платы;
- пайка волной припоя SMD- и PTH-компонентов на нижней стороне платы.

6.2.3.7. Последовательность сборки типа 2D:

- нанесение паяльной пасты на верхнюю сторону платы;
- нанесение клея на верхнюю сторону платы;
- установка SMD-компонентов на верхнюю сторону платы;
- установка PTH-компонентов на верхнюю сторону платы;
- установка PTH-компонентов на нижнюю сторону платы;
- пайка волной припоя верхней стороны платы с экранированием корпусов PTH-компонентов, установленных на верхней стороне платы от контакта с припоем (приспособление);
- нанесение клея на нижнюю сторону платы;
- установка SMD-компонентов на нижнюю сторону платы;
- отверждение клея;
- установка PTH-компонентов на верхнюю сторону платы;
- пайка волной припоя SMD- и PTH-компонентов на нижней стороне платы с экранированием корпусов PTH-компонентов, установленных на нижней стороне платы от контакта с припоем (приспособление).

6.3. Технологии пайки при поверхностном монтаже

6.3.1. Пайка волной

Как упоминалось выше, 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 ла-

минарную 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. 6.18).

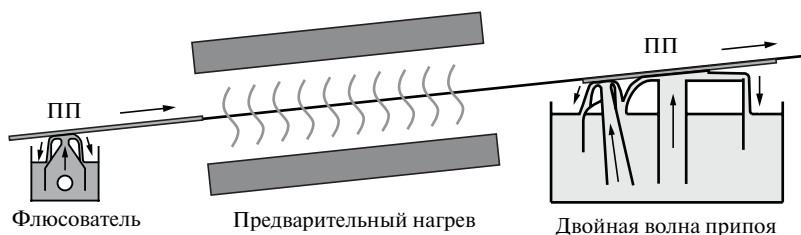


Рис. 6.18. Схематическое изображение процесса пайки волной

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 возникновение перемычек припоя — все еще проблемы, с которыми приходится считаться.

6.3.2. 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 ком-

понентами 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.

6.3.3. 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 избежать 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. Естественно, что монтаж их на плату возможен только методами поверхностного монтажа.

6.4. Последовательность сборки и монтажа

6.4.1. Схема процесса

Общее представление о содержании и последовательности процессов сборки и монтажа дает схема, представленная на рис. 6.19. Ее реализация в расстановке оборудования показана на планировке рис. 6.20. Для лучшего восприятия на рис. 6.21 эта планировка представлена в изометрии.

Конечно, это только стартовый комплект оборудования. Постепенно участок обрastaет дополнительными установками и тестирующими системами для обеспечения устойчивости производства и качества продукции. Вводится система электронной диспетчеризации, автоматические склады и внутрицеховая логистика, электронный документооборот... Если рядом с участком поверхностного монтажа присутствует производство печатных плат или процессы фотохимического фрезерования, заказы на изготовление металлических или сетчатых трафаретов для нанесения паяльных паст можно заказывать у соседей. Но зачастую для изготовления трафаретов используют лазерные установки.

Как правило, контрактные производители электроники оснащены универсальными комплектами оборудования. Но начало оснащения чаще всего специализировано на выполнение конкретного заказа, и по мере наращивания заказов производство приобретает универсальность.

Непременный атрибут сборочно-монтажного производства — участок CAD-CAM, позволяющий обрабатывать поступающие на заказ проекты, адаптировать их к своеобразию оснащения участка, исправлять ошибки в заказных проектах, создавать собственные проекты по схемотехническим решениям Заказчика.

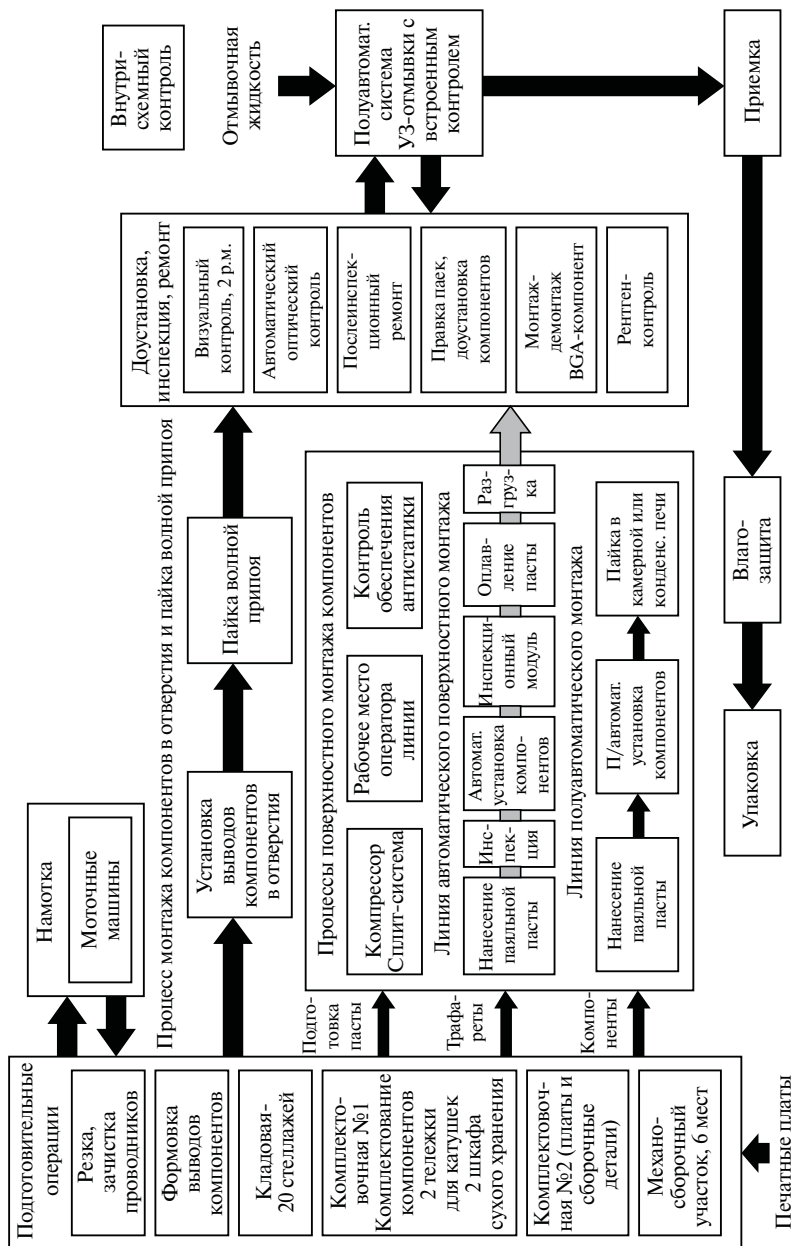


Рис. 6.19. Схема процесса поверхностного и «дырочного» монтажа

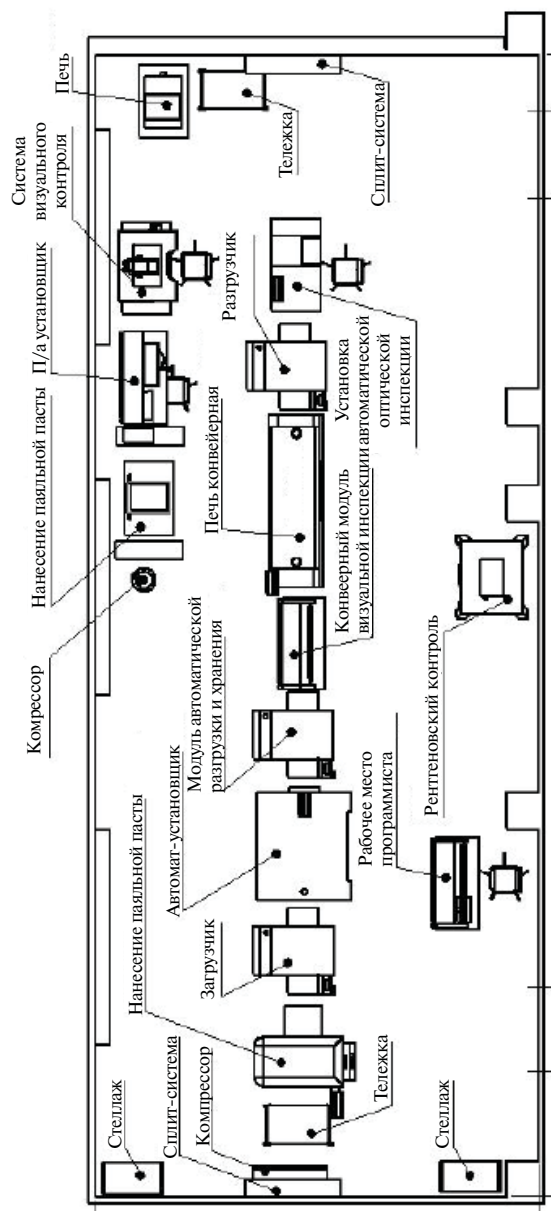


Рис. 6.20. Планировка участка с минимальным набором оборудования

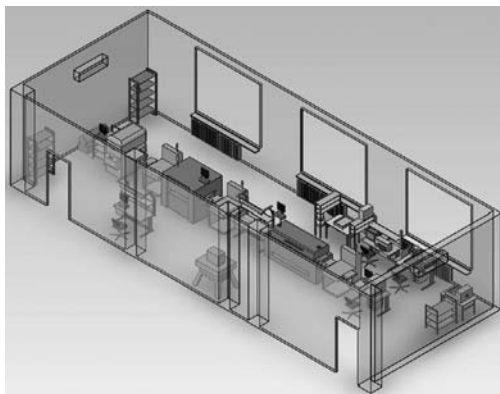


Рис. 6.21. Планировка участка в изометрии

6.4.2. CAD-CAM – системы

Эта сложная стадия создания изделия должна объединять усилия и знания профессионалов разного профиля: конструкторов, технологов, испытателей, специалистов по надежности. Концепция создания таких проектов впервые была провозглашена в 1996 году на международной конференции поверхностного монтажа и получила название DFX (Design For eXcellence). Позже ассоциация SMC (Surface Mount Council) выпустила документ SMC-WP-004, содержащий следующие статьи: Design for Success – Проект для обеспечения успеха, Design for Assembly – Проект для сборки, Design for Fabrication – Проект производства, Design for Test – Проект для тестирования, Design for Reliability – Проект обеспечения надежности, Design for Environment – Проект для испытаний. Авторы статей – специалисты солидных фирм, одновременно сотрудничающих с IPC. Концепция DFX устанавливает требования к сквозному проектированию от оптимизации выбора компонентов и проектирования печатных плат и заканчивая проектом внутрисхемного и функционального тестирования и испытаний. В обстановке глобализации, когда проектировщик может быть географически или организационно удален от производителя, особенно важно установить общие правила и нормы проектирования, чтобы уменьшить издержки на отработку конструкторских решений применительно к реальному производству.

6.4.3. Хранение и подготовка компонентов

Все компоненты и печатные платы должны храниться в своей упаковке, которая должна вскрываться непосредственно перед использованием. Это связано с тем, что распакованные компоненты быстро набирают влагу из окружающей атмосферы. Если содержание влаги станет критическим, при нагреве во время пайки ее интенсивное (взрывное) испарение разрушает и платы, и компонен-

ты, и клеевые точки. Поэтому время пребывания компонентов на воздухе ограничено (Табл. 6.1).

Таблица 6.1. Разделение электронных компонентов на группы в зависимости от чувствительности к влажности

Уровень (группа)	Условия применения		Время выдержки (термообработки)			
			Стандартное		Ускоренное	
	Время	Условия	Время, час	Условия	Время, час	Условия
1	Не ограничено	$\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}/85\%$	$168 \pm 5/-0$	$85^{\circ}\text{C}/85\%$		
2	1 год	$\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}/60\%$	$168 \pm 5/-0$	$85^{\circ}\text{C}/60\%$		
2а	4 недели	$\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}/60\%$	$696 \pm 5/-0$	$30^{\circ}\text{C}/60\%$	$120 \pm 1/-0$	$60^{\circ}\text{C}/60\%$
3	168 часов	$\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}/60\%$	$192 \pm 5/-0$	$30^{\circ}\text{C}/60\%$	$40 \pm 1/-0$	$60^{\circ}\text{C}/60\%$
4	72 часа	$\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}/60\%$	$92 \pm 2/-0$	$30^{\circ}\text{C}/60\%$	$20 \pm 0,5/-0$	$60^{\circ}\text{C}/60\%$
5	48 часов	$\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}/60\%$	$72 \pm 2/-0$	$30^{\circ}\text{C}/60\%$	$15 \pm 0,5/-0$	$60^{\circ}\text{C}/60\%$
5а	24 часа	$\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}/60\%$	$48 \pm 2/-0$	$30^{\circ}\text{C}/60\%$	$10 \pm 0,5/-0$	$60^{\circ}\text{C}/60\%$
6	Указано на этикетке	$\leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}/60\%$	Указано на этикетке	$30^{\circ}\text{C}/60\%$		

Если после распаковки компоненты до конца не использованы, их хранят в специальных шкафах с поддержанием влажности в пределах 5...10%.

Печатные платы доставляются в цех поверхностного монтажа со склада в специальных стеллажных шкафах или стойках на колесиках или в переносной таре.

Каждая печатная плата извлекается из транспортной тары и поступает на монтажный стол, где непосредственно перед нанесением припойной пасты производится ее обезжиривание с помощью тампона из бязи, смоченного в специальной очистительной смеси.

Компоненты доставляются в цех на сборочный стол в специальной переносной таре (рис. 6.22).

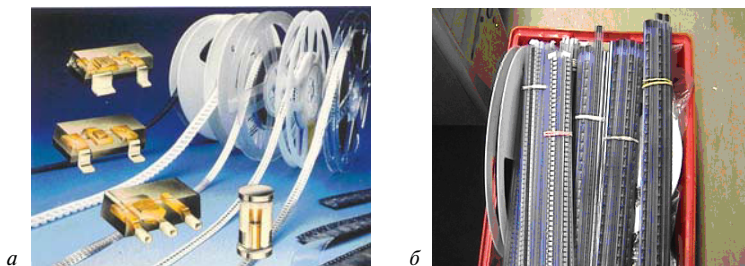


Рис. 6.22. Тара компонентов: а — ленты на катушках, б — трубы

Крупные компоненты (микросхемы), размещаются в пластмассовых паллетах, представляющих собой небольшой прямоугольный поднос с углублениями под компоненты.

Катушки, паллеты и тубы, поставляемые заводами-изготовителями совместимы с большинством современных автоматов установки компонентов, поэтому загрузка их в автомат не сложна. Некоторые компоненты поставляются дискретно или россыпью. Такие компоненты для установки в автомат необходимо кассетировать, то есть поместить в тубы.

Паллеты и тубы помещают в специальные, предусмотренные для них гнезда в автомате установки компонентов. Катушки закрепляют во вспомогательные накопительные устройства (рис. 6.23), которые затем устанавливают в имеющиеся гнезда автомата. Такие питатели обеспечивают свободное извлечение компонентов из лент-носителей в установочном автомате.



Рис. 6.23. Накопительные устройства для катушек с лентами мелких компонентов

Для извлечения припойной пасты, флюса, клея и отмывочной жидкости необходимо вскрыть упаковку в которой поставляются эти материалы. Такая упаковка обычно представляет собой пластиковый контейнер с определенной дозой материала. Некоторые вещества, такие как припойная паста, перед нанесением на печатную плату рекомендуется помешать для обеспечения последующего равномерного нанесения.

6.4.4. 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.

6.4.4.1. Диспенсорный метод нанесения припойной пасты

В прототипном производстве электронных модулей используется диспенсорный метод, в котором используется шприц (рис. 6.24) и устройство нормированного перемещения штока шприца для четкого дозирования пасты припоя. 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 не стоит считать этот метод экономически оправданным по сравнению с трафаретной печатью. Стоимость банки пасты для трафаретного нанесения колеблется в пределах 40–60\$, а одного шприца пасты – 10–20\$.

В основе метода лежит диспенсер – шприц (рис. 6.24). 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 техническим 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.

Нанесение адгезивов

Особо оговорим, что 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.

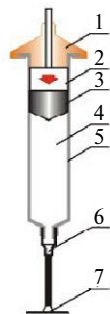


Рис. 6.24. Схема нанесения припойной пасты на контактные площадки с помощью диспенсера: 1 – крышка; 2 – воздух под давлением; 3 – поршень; 4 – припойная паста; 5 – цилиндрический корпус; 6 – сопло; 7 – контактная площадка

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.

6.4.4.2. 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, конечно, 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 мизинцем ладони и перемещать вдоль поверхности трафарета. На рис. 6.25 показан

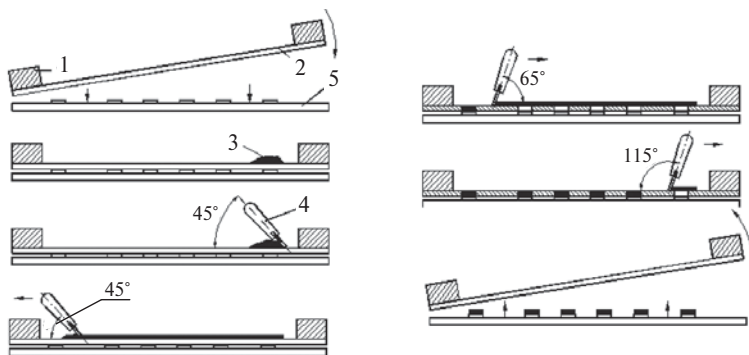


Рис. 6.25. Последовательность операций при трафаретной печати: 1 — рама; 2 — трафарет; 3 — припойная паста; 4 — ракель; 5 — печатная плата

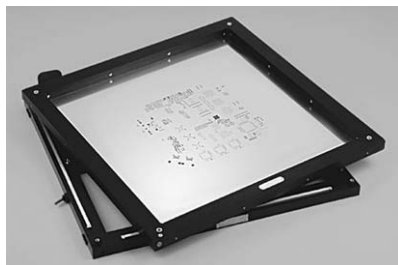


Рис. 6.26. Металлический трафарет простой формы



Рис. 6.27. Гравирование трафарета на лазерном станке

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 ракедь 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 ракедь);
- 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 (рис. 6.26). К этому вынуждает большая вязкость паяльных паст и относительно большой размер частиц припоя, не проходящих через ячейки сит. Кроме того, усилия продавливания через трафарет вязких паяльных паст настолько велики, что даже стальные сита быстро задираются под ракелем и рвутся.

Металлические трафареты изготавливаются лазерной гравировкой (рис. 6.27) или фотохимическим травлением. Лазерное гравирование пред-

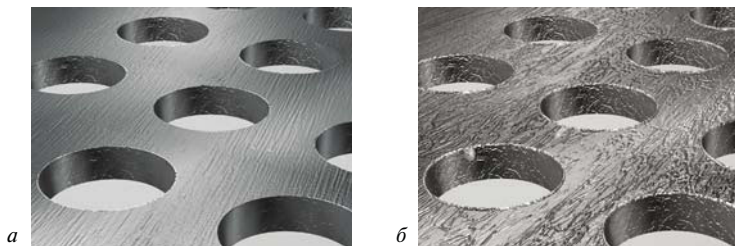


Рис. 6.28. Перфорации в трафарете: *а* — после изготовления, *б* — после использования

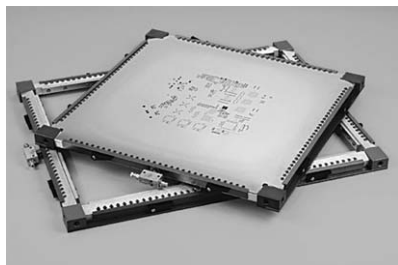


Рис. 6.29. Металлический трафарет с перфорированным технологическим полем



Рис. 6.30. Трафарет с элементами выравнивания натяжения рабочего поля

почтительнее, поскольку им обеспечиваются более ровные края перфораций (рис. 6.28). Травлением такие края не получаются.

Для равномерного натяжения трафареты имеют технологическое поле сложной конфигурации, имеющей много резов при изготовлении (рис. 6.29). В некоторых из них выполняют более сложные вырезы, чтобы выровнять натяжение (рис. 6.30). 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 (рис. 6.31). Тогда демпфирование рабочей части трафарета осуществляется его обрамлением упругой металлической тканью.

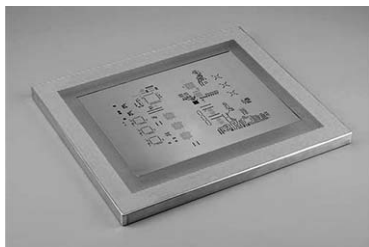


Рис. 6.31. Трафарет с ситовым технологическим полем

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, реально — 15 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 штапелирования 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.

Ракели

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 рапель 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, фирмы 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, так 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.

Трафареты

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. 6.32). Другие производители используют трафареты двойной толщины (система трафарет на трафарете). При использовании таких трафаретов паста наносится только каучуковыми

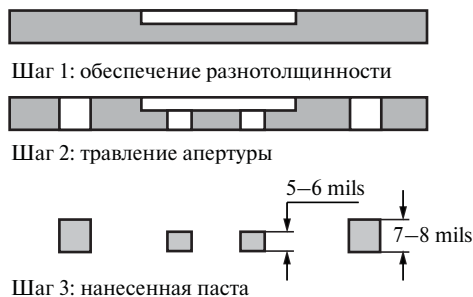


Рис. 6.32. Многоуровневый трафарет

(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.

Химическое травление трафаретов

Химическое травление 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

Поскольку при лазерном изготовлении трафарета нет промежуточного создания фотошаблонов и последующих этапов литографии, 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 достаточен клин боковых стенок апертур в 2° .

Пример, показывающий точность изготовления трафаретов лазерным вырезанием, приведен на рис. 6.33.

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 микро-травлением.

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.

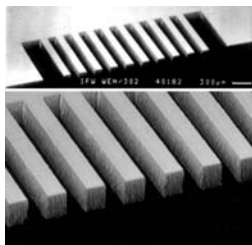


Рис. 6.33. Трафарет, вырезанный лазером

Аддитивный способ изготовления (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.

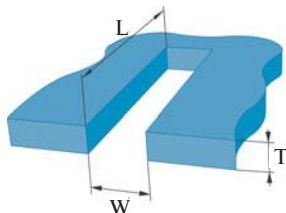
Ключевым этапом получения готового трафарета является отделение никелевого слоя от медной подложки. Этот процесс осуществляется изгибом меди, при котором никель начинает отслаиваться.

Процесс гальванического осаждения, как и метод лазерного вырезания, исключает подтравливание стенок апертур, что исключает забивку пасты под его поверхность. Следовательно, уменьшается вероятность образования замы-

каний на печатных платах. Однако, такая абсолютно вертикальная форма кромок апертур приводит к проблемам при снятии трафарета с платы, на которую нанесена припойная паста.

Конфигурация апертур трафарета

Основным аспектом изготовления трафарета является соотношение ширины минимального окна и толщины трафарета в этом месте, так чтобы выдержать рекомендуемое значение $1...1,5$ (рис. 6.34). Этот параметр выдерживается для предотвращения закупорки трафарета.



Также рекомендуется выдерживать определенное значение отношения площади окна трафарета к площади контактной площадки. Данный параметр рассчитывается по формуле (рис. 6.34):

Рис. 6.34. Соотношение сторон апертуры

$$P = \frac{\text{площадь апертуры}}{\text{площадь стен апертуры}} = \frac{L \times W}{2 \times (L + W) \times T}.$$

В случаях, когда параметр P находится в пределах $0,75...0,66$, рекомендуется лазерная резка желательно с электрополировкой или нанесением слоя никеля. В диапазоне от $0,66$ до $0,50$ рекомендуется гальванопластическое изготовление трафарета. Такие компоненты, как QFP с шагом $0,4$ мм и μ BGA с шагом $0,5$ мм, а также Chip корпуса типоразмеров 0201 попадают в указанные выше диапазоны. Сопоставление характеристик методов изготовления трафаретов показано в табл. 6.2.

Таблица 6.2. Особенности методов изготовления трафаретов

Особенность	Химическое травление	Лазерная резка	Гальванопластика
Точность размеров	3	4	5
Гладкость стенок апертур	4	3	5
Контроль формы стенок апертур	3	4	5
Производительность	5	4	4
Прочность трафарета	5	5	4
Применимость для ultra fine pitch	3	4	5
Стоимость	Низкая	Средняя	Высокая

Система оценки: 5 — отлично, 4 — хорошо, 3 — плохо

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.

6.4.4.3. Рекомендации по применению трафаретов

Анализ способов нанесения пасты и изготовления трафаретов показывает целесообразность следующего применения этих методов:

- Диспенсорный метод нанесения пасты применим на участках прототипной и мелкосерийной сборки плат (низкая производительность);
- Трафаретная печать применима на участках крупносерийного и массового производства. Помимо огромной производительности (десятки плат/ч по сравнению с диспенсорной (единицы плат/ч)), метод обладает высокой точностью нанесения.
- По технологии изготовления трафаретов можно обозначить следующие рекомендации:
- Травление трафаретов приемлемо для узлов широкого потребления и продукции не ответственного назначения.
- Гальванопластика также применяется для узлов широкого потребления. Качество нанесения и точность нанесения обычно ниже, чем у химически выфрезерованных трафаретов (за счет вертикальности стенок).
- Лазерное фрезерование трафаретов применимо для всех случаев массовой продукции. По качеству и точности нанесения эти трафареты превосходят предыдущие два.

6.4.5. Нанесение клея (адгезивов)

Этот процесс неизбежен, если компоненты на нижней стороне платы паяются волной припоя. Без закрепления клеем компоненты смоем волна.

Наиболее широко используемые в клеевых композициях термореактивные смолы обычно отверждаются в присутствии кислых (ангидридов), щелочных катализаторов или отвердителей при комнатной или повышенной температуре. Отверждение сопровождается усадочными явлениями (15...20%), создающими напряженное состояние в клеевом шве. **Эпоксидные клеи** обладают уникально низкой усадкой (порядка 3%), поэтому большая часть клеев используют эпоксидные композиции.

Цианоакрилатные клеи (циакрин), относящиеся к термопластам, тоже могут быть использованы в специальных случаях. Они образуют прочный клеевой шов при сдавливании в течение короткого времени: 1...3 мин. Однако их нагревостойкость ограничена: уже при 60 °С прочность склеивания уменьшается в два раза.

Липкие ленты с двусторонним клеевым слоем применяются для крепления тяжелых компонентов или в качестве теплопроводящей прокладки для теплоотвода от теплонагруженных компонентов. После снятия защитных пленок они прилипают к поверхностям при легком нажатии рукой. Но поскольку используемые в них эластомеры относятся к разряду термопластов, групповой нагрев для них противопоказан, поэтому пайка таких приклеенных компонентов производится селективно после групповой пайки.

Электро- и теплопроводящие адгезивы с наполнением диспергированным металлом используются там, где нет возможности нагревать компоненты для пайки. Использование в качестве наполнителей благородных метал-

лов делало их недоступными из-за дороговизны. Попытки использования в качестве наполнителя дешевых металлов (например, меди) не увенчались успехом: первоначальная относительно хорошая проводимость падала со временем за счет постепенного окисления поверхности медных частиц. Выход был найден в металлизации стеклянных шариков серебром. В качестве полимера электропроводящих адгезивов предпочитают использовать силиконы, сохраняющие в течение длительного времени контактное сдавливание частиц друг с другом. Уже появились примеры использования непаяных соединений на основе изотропных и анизотропных проводящих адгезивов.

Эпоксидные клеи нашли наиболее широкое применение для крепления компонентов при пайке волной припоя и групповой пайке тяжелых компонентов, не удерживающихся на монтажных поверхностях силами поверхностного натяжения расплавленного припоя. Они обеспечивают хорошую адгезию практически ко всем материалам, имеют хорошие электроизоляционные свойства, быстро отверждаются, выдерживают термоудары при пайке, влагостойки, в соответствующих эпоксидных композициях не создают разрушающих термомеханических напряжений. Стандартный состав однокомпонентных эпоксидных композиций содержит саму эпоксидную смолу, отвердители для горячего отверждения (ангидриды органических кислот), пластификаторы для обеспечения нужной тиксотропности, наполнитель и краситель. Цвет красителя выбирают, исходя из обеспечения хорошего контраста с цветом подложки. Хранение при низких температурах (+5 °C) позволяет продлить время жизни однокомпонентного эпоксидного адгезива до приемлемых значений.

Двухкомпонентные клеи удобны для ремонтных работ, так как они способны отверждаться при комнатных температурах. Однако однокомпонентные адгезивы обладают сравнительно лучшими свойствами и широко используются в автоматических линиях (табл. 6.3). Отверждение однокомпонентных композиций начинается при 100 °C, практически используют температурный режим от 110 до 160 °C.

Таблица 6.3. Сравнительная оценка одно- и двухкомпонентных композиций эпоксидных клеев

Параметры	Двухкомпонентный жидкий эпоксидный клей	Однокомпонентная эпоксидная паста
Композиция	Часть А: жидкая модифицированная эпоксидная смола; часть В: модифицированный отвердитель	Жидкий эпоксидный компаунд с введенным отвердителем
Вязкость при комн. Темп., срс	Часть А: > 140000 Часть В: > 100000	>250 000
Соотношение компонентов	1/1 (по весу или объему)	

Таблица 6.3. Окончание

Параметры	Двухкомпонентный жидкий эпоксидный клей	Однокомпонентная эпоксидная паста
Время жизни	30 мин. при комн. темп.	12 месяцев при комн. темп.
Время отверждения	18...24 ч. при комн. темп.	30...40 мин. при 150...180 °С
Разрушающее напряжение сдвига (алюминий/алюминий), кПа:		
при комн. темп.	150	250
при 80 °С	60	200
при 15 °С	35	125
После выдержки в течение 30 дней при 230 °С, измерения при комн. темп.	150	230
После погружения в воду при комн. темп. в течение 30 дней	150	230
Усилие отрыва полоски фольги 10 мм при комн. темп., кг	4	5

Формы клеевых капель определяются тиксотропными свойствами композиции, ее вязкостью и другими факторами: объемом капли, диаметром сопла диспенсера и высотой, с которой выдавливается капля на плату. После установки компонента на клей его форма расплющивается, но область его расширения не должна попадать на контактные площадки с паяльной пастой.

В неотвержденном состоянии клеи интенсивно поглощают влагу. При отверждении они частично оставляют ее в своем объеме, и при пайке может происходить ее интенсивное освобождение, в результате чего клеевые швы могут получить вакансии, которые потом при эксплуатации могут наполняться атмосферной влагой. Поэтому в течение всего времени использования клеев необходимо предотвращать их возможное увлажнение.

В более чем 90% случаях клей наносят с помощью диспенсеров с использованием шприцов. Для увеличения производительности используют многоголовочные системы, подобные показанной на рис. 6.35. Такая система обеспечивает производительность до 50 тыс. точек в час, соизмеримую со скоростью установки компонентов. Однако



Рис. 6.35. Многоголовочный диспенсер

интерес к трафаретному методу расширяется, хотя еще не преодолены многие трудности, связанные с затвердеванием клея на трафарете и неустойчивостью форм клеевых капелек.

6.4.6. Установка компонентов

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

6.4.6.1. 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. Поэтому для производительности комплекта 500...700 компонентов в час соответствует производительность производства плат 20...25 дм плат в смену.

Типичное мнение о достаточности полуавтоматов для изготовления прототипов является ошибочным, так как существует ряд типоразмеров компонентов, не поддающихся ни ручной, ни полуавтоматической установке. При этом такие компоненты становятся неотъемлемой частью современных электронных модулей.

6.4.6.2. 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-компо-



Рис. 6.36. Модуль установки компонентов

нентов. С точки зрения точности позиционирования эта система лучшая из трех систем (рис. 6.36).

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 одноголовочные 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.

6.4.6.3. Управление точностью установки

Второй присутствующей в автоматах сборки функцией является видеосистема, управляющая точностью позиционирования. Именно с ее помощью точно ус-

танавливается 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 видеокамерой. Время распознавания увеличивается по мере увеличения размеров и сложности компонентов. Для компенсации увеличивающегося времени распознавания питатели 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 видеосистем 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.

6.4.6.4. 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 питателями из лент и вибробункеров. Мало того, 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.

Мало того, рынок электронных модулей не уменьшил, 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 Royponic, 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 сек.

6.4.6.5. 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.

6.4.6.6. Обновление оборудования

При оснащении производства новым оборудованием важно знать, какое оборудование может понадобиться 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. Такое решение 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.

6.4.6.7. 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.

6.5. Пайка

Пайка оплавлением в технологиях поверхностного монтажа существует уже два десятка лет. Фундаментально она за это время не изменилась. Изменились только корпуса компонентов и материалы пайки, появилась серия печей с конвекционным нагревом, обеспечивших более эффективные температурные режимы пайки. Пайка оплавлением, конденсационная пайка, локальная лазерная пайка и ручные виды паяк с различными способами нагрева останутся преобладающими в будущих технологиях монтажа.

6.5.1. Термопрофиль

Термовременные профили оплавления обычно рекомендуются поставщиками паяльных паст. Минимальную температуру выбирают, исходя из температуры плавления эвтектического припоя, так чтобы произошло полное смачивание спаиваемых поверхностей для образования правильной паяной галтели. При этом приходится учитывать размер сферических частиц припоя и характер флюса в паяльной пасте, активность спаиваемых поверхностей, теплоемкость компонентов, глубину пропая. Для эвтектического припоя Sn63/Pb37 это температура T_l от 200 до 225 °C. Типично для других сплавов

минимальная температура T_l приблизительно на 15...20 °C выше температуры ликвидуса.

Верхнее ограничение температуры пайки T_2 создает максимально возможная температура кратковременного нагрева компонентов, специально устанавливаемая в их сертификатах, если это ограничение оправдано низкой устойчивостью компонентов к режимам пайки. С учетом метрологической погрешности верхний предел нагрева устанавливают на 5° меньше установленной для самого «нежного» компонента. Если наличие таких компонентов не дает возможности установить нормальный температурный диапазон пайки, их устанавливают и паяют вручную или локально лазером.

Превышение температуры T_2 и времени пребывания в зоне плавления опасно не только для «нежных» компонентов, но и возможностью интенсивного образования интерметаллоидов, термодеструкции материалов плат и компонентов, снижающих надежность электронных изделий.

Очевидно, температурный градиент, устанавливающийся в печи, должен укладываться в диапазон ($T_2 - T_l$). Чтобы не выйти из этих пределов, в печи создают несколько зон, так чтобы скорость нагрева-охлаждения при движении конвейера не превышала 4 °C в секунду или меньше. На рис. 12 показан типичный температурный профиль при пайке оплавлением. В первой зоне предварительного нагрева плата нагревается до 100 °C. Во второй зоне, непосредственно перед зоной плавления, нагрев достигает уровня 150...170 °C (для Sn63/Pb37). Зону оплавления изделие проходит за 20...30 с так, чтобы темпера-

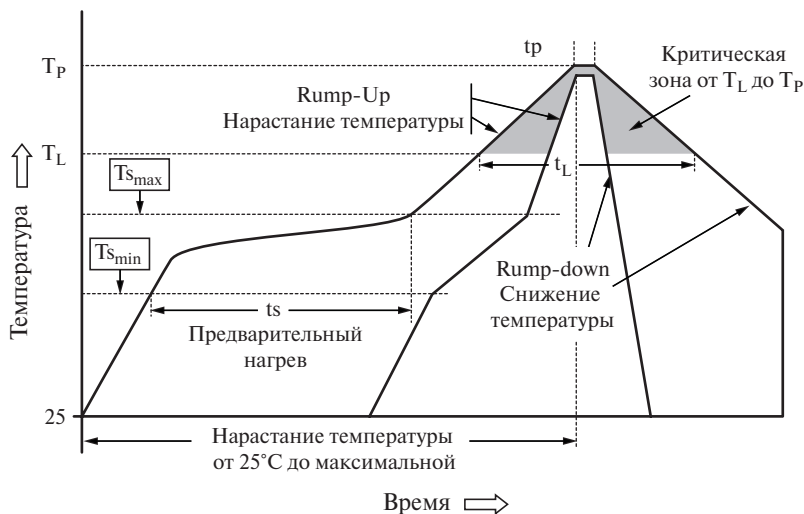


Рис. 6.37. Классификационный температурный профиль, рекомендуемый стандартом IPC JEDEC J STD 020C

тура его нагрева в экстремуме уложилась в диапазон ($T_2 - T_1$). Скорость охлаждения также должна быть регламентирована.

Для измерения температурного профиля обычно используют термостатизированный блок термопар, так что холодные спаи находятся в термостате, а горячие — в точках измерения. Блок снабжен устройством записи температуры. Большая часть таких приборов питаются автономно от встроенных аккумуляторов. Термопары подсоединяют к «легким» и «тяжелым» компонентам, на краях платы и вблизи центра. Таким образом удастся получить максимально достоверные результаты измерений.

Классификационный температурный профиль, рекомендуемый стандартом IPC JEDEC J STD 020C (июль 2004 г.) показан на рис. 6.37 с расшифровкой контрольных точек в табл. 6.4.

Таблица 6.4. Параметры классификационного температурного профиля, рекомендуемая стандартом IPC JEDEC J STD 020C (июль 2004 г.)

Параметры профиля	Sn - Pb	Pb - free
Скорость нарастания температуры от T_{smax} до T_p	3 °C в секунду, макс	3 °C в секунду, макс
Предварительный нагрев T_{smin} T_{smax} Время нарастания от T_{smin} до T_{smax}	100 °C 150 °C 60 ... 120 секунд	150 °C 200 °C 60 ... 120 секунд
Параметры оплавления Температура перехода TL Время оплавления tL	183°C 60 ... 150 секунд	217°C 60 ... 150 секунд
Параметры профиля	Sn - Pb	Pb - free
Максимальная температура	см. табл. 4 - 1	см. табл. 4 - 2
Время нахождения в температурном диапазоне от ($T_p - 5$) до T_p	10 ... 30 секунд	20 ... 40 секунд
Скорость снижения температуры	6 °C в секунду, макс	6 °C в секунду, макс
Время нарастания температуры от 25 °C до T_p	6 минут максимум	8 минут максимум

При пайке компонентов обратной стороны платы трудно рассчитывать, что тяжелые компоненты на нижней стороне удержатся за счет поверхностного натяжения припоя. Для определения необходимости их приклейки обычно руководствуются упрощенной оценкой: масса компонента в граммах, деленная на суммарную монтажную площадь компонента в квадратных дюймах, не должна превышать 30.

Пайка в атмосфере азота стала обычным явлением в производствах, где желают достичь высокого уровня надежности. Использование нейтральной

среды обусловлено недостаточной активностью флюсов в растворении окислов в течение всего цикла пайки, термоокислительной деструкцией материалов электроизоляционных элементов конструкций электронных модулей. Пайка в атмосфере азота оставляет гораздо меньше дефектов и в меньшей степени травмирует материалы. А если говорить об использовании дешевых финишных покрытий печатных плат на основе органических ингибиторов (OSP – organic solderability preservatives), то повторная пайка, которая бывает нужна для пайки второй стороны платы, особенно нуждается в нейтральной среде для предотвращения окисления монтажных площадок. Конечно, использование азота требует организации станции непрерывного газоснабжения, но альтернативой ему может быть только обильное нанесение флюса с относительно большим объемом сухого остатка, требующего тщательной отмывки и соответствующих расходов.

Независимо от высокого уровня автоматизации сборочно-монтажных работ по-прежнему остаются актуальными ручные паяльные и ремонтные станции фирм Pace, Weller (Cooper Tools), ERSА. К этому ряду прибавилась фирмы Kohler и MARTIN. Безусловно, ремонтные и наладочные работы должны быть снабжены всеми видами инструментов для демонтажа, снятия лака, напайки перемычек, очистки, подлакировки и т.д.

6.5.2. Методы нагрева

Основным механизмом передачи тепла, используемым в установках пайки с ИК-нагревом, является излучение. Передача тепла излучением имеет большое преимущество перед теплопередачей за счет теплопроводности и конвекции. Это единственный из механизмов теплопередачи, обеспечивающий передачу тепловой энергии по всему объему монтируемого устройства (за исключением затененных участков). Остальные механизмы теплопередачи обеспечивают передачу тепловой энергии только поверхности монтируемого изделия.

В процессе пайки ИК-излучением скорость нагрева регулируется изменением мощности каждого излучателя и скорости движения конвейера с ПП (для печей конвейерного типа). Основным недостатком пайки ИК-нагревом является то, что количество энергии излучения, поглощаемой компонентами и платами, зависит от поглощающей способности материалов, из которых они изготовлены: если не вдаваться в подробности механизма теплопередачи и теорию расчетов коэффициентов поглощения, можно сказать, что, чем «чернее» нагреваемое тело, тем эффективнее его нагрев ИК-методом. Поэтому в пределах монтируемого устройства нагрев осуществляется неравномерно. Кроме того, не стоит забывать про теневые эффекты (невозможность пропайки выводов под корпусами микросхем).

Поэтому в современных печах используют сочетание длинноволновых и коротковолновых излучателей, что позволяет осуществить более равномерный прогрев поверхности сборки (хотя и в этом методе есть свои особенности: про-

грев зависит от массы нагреваемых изделий и их распределения по плате). В таком варианте компоновки печи тепло ПП и компонентам передается как за счет излучения (70%), так и конвекцией (30% — при помощи принудительной вентиляции воздуха в рабочей камере).

В связи с вышесказанным печи для ИК-пайки изготавливают таким образом, чтобы на стадии предварительного нагрева изделие подвергалось воздействию длинноволновых нагревателей, обеспечивающих более высокую равномерность нагрева, а на стадии пайки — комбинированному действию ИК-излучателей и конвекционного нагрева. Наиболее эффективное сочетание нагрева: ИК-прогрев всей сборки + принудительная конвекция (длинноволновые нагреватели + принудительная циркуляция воздуха в зоне пайки).

В последнее время нередко используются печи с заполнением камер пайки азотом. Такой подход позволяет устранить кислород и зоны пайки и значительно снизить окисление, однако не стоит забывать и об экономической стороне процесса: нужно с учетом программы выпуска рассчитать, что будет дешевле — постоянный напуск азота в печь или использование флюсов и их последующая отмывка.

6.5.3. Требования, предъявляемые к печам пайки оплавлением

Основным требованием, предъявляемым к печи (помимо требуемой производительности), является точная выдержка температурного профиля изделия (рис. 6.36). На стадии 1 осуществляется предварительный нагрев платы, предотвращающий коробление изделия при температуре расплавления припоя. Практический опыт пайки показывает, что слишком высокая скорость нагрева изделия до температуры активации флюса может привести к такому дефекту, как припойный бисер, последствиями которого является разбрызгивание мелких шариков припоя по дну компонента и поверхности платы из-за повышенного газовыделения припойной пасты. Поэтому максимальная скорость предварительного нагрева не должна быть более 2–4 °C/сек.

Главным фактором на втором этапе пайки является выдержка платы при температуре активации флюса в течение времени, необходимого для активации и полного испарения флюсовой составляющей припойной пасты. Кроме того, зона теплового насыщения (2) позволяет избежать смещения компонентов относительно контактных площадок платы вследствие разности коэффициентов температурного расширения корпусов и текстолита.

Время нагрева изделия на первых двух этапах пайки рассчитать точно обычными методами тепловой техники практически невозможно из-за большого количества вариантов сборок печатных плат (в одном случае поверхность текстолита может быть полностью оптически открыта, в другом поверхность платы может закрываться корпусами интегральных компонентов до значения коэффициента перекрытия 50–80%). Однако обобщение экспериментальных

данных позволяет говорить о том, что время всего цикла предварительного нагрева колеблется от 1 до 2-х минут независимо от скорости нагрева (естественно, при условии, что она не будет превышать 2–4 °С/сек).

По завершении цикла преднагрева начинается цикл пайки изделия (3 участок рис. 6.36). При пайке скорость роста температуры до значения t расплавления припоя должна быть по возможности высокой, для того чтобы избежать перегрева компонентов печатной платы. На практике рост температуры со 120 до 200–220 производится в течение 10–15 секунд, после чего осуществляется выдержка температуры пайки в течение времени, необходимого на самоустановку компонентов (10 – 15 секунд).

После выполнения цикла пайки нагреватели печи выключаются (в случае камерных печей) либо плата перемещается на конвейере в зону охлаждения (для конвейерных печей).

Далее следует этап охлаждения платы, который в зависимости от типа печи и требований по производительности может осуществляться двумя вариантами:

1. Естественное охлаждение в печи до времени отверждения припоя, затем на воздухе.
2. В блоке принудительного охлаждения.

В условиях крупносерийного и массового производства время охлаждения не рассчитывается, так как печатная плата с напаянными компонентами охлаждается принудительно в блоке охлаждения после транспортировки из блока пайки. Процесс пайки одной платы и остывания и выгрузки другой ведется параллельно, что значительно повышает производительность.

В условиях мелкосерийного и единичного производства время охлаждения также не учитывается, так как можно утверждать, что время охлаждения печи до температуры затвердевания припоя несравнимо мало времени относительно всего цикла пайки и незначительно влияет на производительность печи. Обычно время естественного охлаждения припоя до температуры отверждения менее 20 секунд. Сравнительно быстрое падение температуры в печах подобного класса обусловлено конструкционными особенностями: печи представляют собой стационарную камеру нагрева с большими тепловыми потерями через окно загрузки, которое, как правило, остается открытым в течение всего цикла пайки.

Кроме того, некоторые типы камерных печей, применяющихся в мелкосерийном и единичном производстве, оснащаются механизмом автоперемещения плат в камеру пайки и на открытое пространство для охлаждения.

6.6. Очистка

Технологии очистки находятся в состоянии постоянного совершенствования. Широко используемая в России спирто-бензиновая смесь для отмывки

плат от остатков флюса и технологических загрязнений теряет эффективность по мере уменьшения размеров компонентов. В уменьшающихся пазах и зазорах нет нужного обмена раствора, чтобы вымыть оттуда технологические загрязнения. Желание улучшить отмывку увеличением времени отмывки приводит к вымыванию связующего, образованию белесоватости на поверхности плат. Практикуемая в зарубежье конденсационная очистка, использующая хлорированные и фторированные углеводороды, постепенно исчезает в интересах экологии. В то же самое время требования к очистке непрерывно ужесточаются. В электронной индустрии, где чистота была всегда важна, она стала еще более критическим фактором в обеспечении состоятельности высоких технологий. Кажется, что каждое усовершенствование в технологии требует большего и большего внимания к чистоте для его реализации. В результате технологии очистки были критически пересмотрены в течение последних нескольких лет. Многие из них продвигаются за счет использования ультразвуковой технологии.

Очистка должна удалять загрязнения всех типов: остатки солей электролитов, травящих растворов, осветлителей, масла, флюсы, активаторы флюсов, жировые отпечатки пальцев и загрязнения поверхностей из атмосферы (жировые загрязнения, пыль, ворсинки, абразивные частицы).

Загрязнения органического происхождения часто представляют собой тонкую жировую пленку, покрывающую поверхность сплошным слоем. Силами молекулярного взаимодействия жировая пленка прочно удерживается на поверхности. Чем тоньше пленка, тем труднее ее удалить. Пленку удаляют растворением в органических растворителях или эмульгированием.

Эффективность удаления загрязнений при растворении, эмульгировании или механической очистке зависит от физических и химических свойств очищающих сред и методов их использования. При этом необходимо создать следующие условия:

- очиститель должен растворять или эмульгировать как полярные, так и неполярные соединения, пленки жировых загрязнений и флюса, масла, защищающие поверхность припоя, удалять остатки солей, используемых при изготовлении печатных плат;
- с очищаемых поверхностей должны быть удалены твердые частицы загрязнений: частички нерастворимых веществ, крошево (результат термоэрозии), пыль, ворсинки, волокна и т. п.;
- очистители не должны повреждать элементы печатных плат, маркировочные знаки, размягчать и растворять пластмассу и эластомеры, взаимодействовать с металлами.

Выбрать наилучшие и просто удовлетворительные очищающие средства довольно трудно, хотя существует много различных очистителей. В отечественной промышленности используются главным образом спирт, спирто-бензиновая и спирто-бензино-ацетоновая смеси, алифатические и ароматические

углеводороды, фреоны, деионизированная вода, водные растворы поверхностно-активных веществ.

Спирты, кетоны, алифатические и ароматические углеводороды — относительно недорогие растворители. За исключением этилового спирта и некоторых алифатических углеводородов, многие из этих растворителей токсичны, что составляет основную проблему их применения. Кроме того, все они пожаро- и взрывоопасны. Самый распространенный очиститель на основе спирто-бензиновой смеси (1:1) в дополнение к этим недостаткам неудобен непостоянством состава из-за различных скоростей испарения компонентов, трудностью регенерации смеси. Спирто-бензино-ацетоновой смеси свойственна относительно высокая активность к растворению маркировочных знаков, некоторых пластмасс и диэлектрика печатных плат.

Этиловый спирт хорошо удаляет остатки канифольного флюса и растворяет некоторые неорганические загрязнения, но не воздействует на масляные и жировые пленки, под которыми может оказаться значительное количество загрязнений. Ароматические углеводороды применяют, когда требуется сильная способность к растворению.

Удаление жировой пленки органическими растворителями основано на их способности растворять жировые загрязнения благодаря сродству химической структуры их молекул. Минеральные масла растворяются в углеводородах, растительные масла и канифоль — в спиртах. После промывки и испарения растворителя на поверхности подложки остается пленка загрязнений, ранее растворенных в испаренном слое растворителя. Поэтому для качественного обезжиривания особое значение имеет удаление с очищаемой поверхности остатков моющего состава со следами удаляемой жировой пленки. Наиболее эффективна очистка в парах растворителя, основанная на конденсации пара растворителя на холодных поверхностях электронного модуля. Конденсат растворяет загрязнения и стекает в испаритель, где вновь испаряется, отделяясь от загрязнений.

Перспективной считается замена органических растворителей пожаробезопасными. Среди таких растворителей привлекают внимание фреоны — группа фторхлоруглеводородов жирного ряда, которые благодаря своим термодинамическим свойствам нашли широкое применение в холодильных установках. Для очистки применяют жидкие фреоны. Фреоны не растворимы в воде, не горючи, не образуют взрывоопасных смесей с воздухом, химически инертны, хотя при контакте с открытым пламенем разлагаются с выделением ядовитых газов. Пары фреонов в 6... 10 раз тяжелее воздуха, что создает условия использования их в установках для финишной очистки в парах растворителя с малым расходом очистительной смеси.

Растворяющая способность чистых фреонов недостаточна для удаления остатков канифольных флюсов. Поэтому используют азеотропные смеси фреонов с соответствующими растворителями (чаще со спиртом). Азеотропными

называют жидкие смеси, при кипении и конденсации которых состав смеси не меняется. Такие смеси выкипают и конденсируются при постоянной температуре, не разделяясь.

Низкое поверхностное натяжение фреонов (18... 23 дин/см, в то время как для воды 73 дин/см) позволяет им проникать в углубления, пазухи и под скопления грязи, легко вытекать из капилляров и щелей, создавая условия для обмена моющей жидкости. Они обладают исключительной способностью к смачиванию поверхностей, смачивают даже поверхность фторопласта.

Обычно применяют фреон Ф-113 — трифтортрихлорэтан, отличающийся способностью к растворению масел и смазок, кремнийорганических жидкостей и других загрязнений органического происхождения. Низкая температура кипения и теплота парообразования позволяют использовать его для экономичной очистки термочувствительных элементов и деталей аппаратуры. Его азеотропная смесь с этиловым спиртом (9: 1) позволяет смыть практически всю гамму органических загрязнений, сопутствующих процессам монтажа.

Эмульсия, содержащая фреон Ф-113, деионизированную воду и поверхностно-активные вещества (ПАВ), способна удалять не только органические загрязнения, но и растворимые в воде минеральные соли. В такой системе ПАВ располагаются на границе диспергированных во фреоне капель воды. Очистка происходит как на границе двух фаз, где сосредоточены практически все ПАВ, так и во фреоне.

Большое будущее для очистки имеют водные растворы ПАВ, разрушающие жировые пленки и остатки канифольного флюса путем их разрыва и эмульгирования и смывающие растворимые неорганические загрязнения. Типичные ПАВ — органические вещества дифильного строения, т. е. содержащие в молекуле атомные группы, сильно отличающиеся по интенсивности взаимодействия с окружающей средой, в данном случае — с водой. Один или несколько углеводородных радикалов молекул ПАВ, составляют олео- или липофильную часть, обладающую гидрофобностью. Одна или несколько полярных групп — гидрофильная часть. Слабо взаимодействующие с водой олеофильные (гидрофобные) группы определяют возможность растворения углеводородных (неполярных) загрязнений. Гидрофильные группы, наоборот, удерживают молекулу в полярной среде (в воде).

По типу гидрофильных групп ПАВ делят на ионные, или ионогенные, и неионные, или неионогенные. Ионные ПАВ диссоциируют в воде, их остатки на поверхности монтажа создают проводимость, т. е. их нужно полностью удалять, что не всегда удается в силу их поверхностной активности.

Неионогенные ПАВ не требуют тщательной отмывки и поэтому предпочтительнее в процессах очистки в сборочно-монтажном производстве.

Особое внимание уделяется производству ПАВ с линейным строением молекул. Они легко подвергаются биохимическому разложению в природных условиях и не загрязняют окружающей среды.

Интенсификация процессов очистки. В процессе очистки плат растворимые в очищающей среде загрязнения переходят в раствор и уносятся вместе с ним. Показателем интенсивности этого процесса служит разность концентрации вещества в слое, прилегающем к поверхности пленки загрязнения, и концентрацией этих веществ во всем объеме жидкости. Одним из основных факторов, влияющих на интенсивность растворения, является скорость диффузии: количество вещества, продиффундировавшего к поверхности раздела фаз в единицу времени. Интенсивное перемешивание уменьшает толщину диффузионного слоя, что увеличивает скорость очистки: толщина диффузионного слоя обратно пропорциональна корню квадратному из относительной скорости движения фаз.

Перемешивание очищающей жидкости можно осуществлять механическими способами: барботированием, наплескиванием растворителя на очищаемые поверхности, наложением на ванну вибрации низкой (100 Гц) частоты от электромагнитного вибратора, питаемого от сети 50 Гц, струйным распылением растворителя и т. п. Повышение температуры размягчает жировые пленки и остатки канифоляного флюса, что облегчает их разрушение и отделение.

Принципиально отличается от любых видов механического перемешивания наложение на ванну с очищающей жидкостью ультразвукового поля, вызывающее интенсивное перемешивание жидкости акустическими течениями.

Вихревые потоки, возникающие вблизи препятствий, разрушают ламинарный слой на границе жидкость — твердое тело, способствуют снятию концентрационных и диффузионных ограничений. Наряду с общими потоками в жидкости существуют локальные интенсивные микропотоки, вызываемые колеблющимися вблизи твердой поверхности парогазовыми (квитанционными) пузырьками. Гидродинамические потоки и микропотоки вокруг неровностей на границе жидкость — твердое тело ускоряют процессы растворения пленок и способствуют перемешиванию компонентов в жидкой среде. Механическое разрушение поверхностных пленок в акустическом поле является основным следствием кавитации. Если очистка производится в водных растворах, кавитационные пузырьки преимущественно возникают на поверхности жировой пленки и канифоляных загрязнений из-за слабого смачивания их поверхностей водой. Кавитационные пузырьки производят микроударные нагрузки поверхностных пленок загрязнений, под действием которых наступает их эрозия. Концентрируясь на краях внешней и внутренней поверхностей отслоившихся частей пленок, пузырьки отслаивают либо отрывают пленку, разбивают ее и эмульгируют, облегчая тем самым процесс удаления загрязнений с поверхности ПП.

Интервал интенсивностей озвучивания (плотность энергии) при ультразвуковой очистке в диапазоне частот 20... 50 кГц составляет 0, 5... 3 Вт/см². При интенсивностях выше 5 Вт/см² облако кавитационных пузырьков на-

столько увеличивается, что это приводит к заметному уменьшению интенсивности ультразвука на некотором расстоянии от излучателя. Применение чрезмерных интенсивностей ультразвука для очистки печатного монтажа недопустимо, так как в условиях развитой кавитации происходят усиленное эрозионное разрушение поверхности диэлектрика печатных плат, отслоение контактных площадок, ослабление паек, нарушения герметичности электронных компонентов, разрушения элементов конструкции. Опыт работы дает основание рекомендовать для очистки электронных модулей ультразвуковые установки, обеспечивающие интенсивность колебаний в рабочей зоне в пределах 0,4...0,6 Вт/см². Однако предпочтение надо отдать докавитационным режимам очистки, обеспечивающим менее агрессивное воздействие.

Контроль качества очистки. Качество отмывки и последующей лакировки можно гарантировать, только если есть возможность убедиться, что все загрязнения (неорганические и жировые) с поверхности печатных плат удалены.

Наиболее простой метод контроля обезжиривания — испытания на разрыв водяной пленки. Если смоченная деионизированной водой поверхность не имеет гидрофобных загрязнений, водяная пленка распределяется тонким равномерным слоем.

Содержание канифоли в спирто-бензиновых смесях из контролируемой ванны можно определить химическим анализом. Если требуется определить только присутствие канифоли, производят выпаривание анализируемого раствора. После выпаривания в небольшом фарфоровом тигле к осадку добавляют несколько кристаллов хлористого кальция, повторно нагревают тигель и прибавляют в него каплю серной кислоты. При наличии канифоли появляется ярко-красное свечение.

Так как флюсы могут содержать активные вещества, представляющие собой ионогенные продукты, концентрацию их в моющем растворе можно определить измерением электрического сопротивления раствора. Допустимое снижение сопротивления моющего раствора не должно превышать 20×10^3 Ом·см.

6.7. Материалы лаковых покрытий

Правильно выбранные и тщательно нанесенные на очищенную поверхность лаковые покрытия защищают электронный модуль от прямого воздействия влаги, пыли и грязи, атмосферных загрязнений (дым, химические испарения и т. п.), загрязнения руками, от прямого замыкания проводящими частицами, металлическими опилками и обрезками, падающими инструментами и т. д., от повреждений при вибрации и ударах.

Второе назначение лаковых покрытий — дополнительно удерживать элементы на ПП, частично разгружая паяные соединения.

Применению лаковых покрытий свойственны определенные недостатки:

- при плохом качестве очистки лаковые пленки способствуют наступлению отказа из-за осмотических явлений;
- заполняя изоляционные пространства лаки увеличивают емкость между элементами печатного монтажа;
- лаки имеют высокие значения ТКЛР, поэтому они могут вызвать нежелательные напряжения в некоторых элементах, повредить паяные соединения;
- растворители, используемые в некоторых лаках, вызывают набухание основания плат, что приводит к разрыву внутренних соединений, мetailлизации отверстий;
- электроизоляционные лаковые покрытия используются без грунтового покрытия, поэтому они имеют слабую адгезию к металлическим поверхностям, в частности к пайкам;
- за исключением параксилиленовых покрытий, все другие лаковые покрытия не обладают необходимой сплошностью, имеют поры, точечные проколы, обнажения острых кромок на печатных проводниках и выводах элементов.

Краткие характеристики типовых электроизоляционных лаков, используемых для защиты печатного монтажа, следующие.

Полиэфирные лаки. Диапазон температур $-55...+125^{\circ}\text{C}$. Общее назначение — нежесткие условия. Имеют хороший внешний вид. Удаляются ксиленом и толуолом.

Акриловые покрытия. Диапазон температур $-60...+135^{\circ}\text{C}$. Применяются там, где требуются хорошие электроизоляционные свойства. Имеют очень хороший внешний вид. Удаляются метилэтилкетонem.

Покрытия на основе эпоксидных смол. Диапазон температур $-60...+200^{\circ}\text{C}$. Применяются там, где нужны очень хорошие электроизоляционные свойства. Тонкие покрытия можно паять насквозь. Удаляется механически. Поддается восстановлению после ремонта за счет процессов холодного отверждения. Имеет хороший внешний вид.

Полиуретановые покрытия. Диапазон рабочих температур $-60...+120^{\circ}\text{C}$. Применяются там, где требуется низкая влагопроницаемость и сопротивление истиранию. Тонкие покрытия можно паять насквозь очень горячим (420°C) паяльником. Удаляются механически. Поддаются восстановлению после ремонта. Имеют тусклый внешний вид.

Кремнийорганические покрытия. Диапазон рабочих температур $-60...+260^{\circ}\text{C}$. Применяются там, где требуются высокие диэлектрические свойства, дугостойкость, нагревостойкость. Поддаются восстановлению после ремонта. Имеют хороший внешний вид.

Кремний-каучуковые покрытия. Диапазон рабочих температур $-60...+260^{\circ}\text{C}$. Применяется там, где требуются эластичность покрытия, нагре-

востойкость, стойкость к истиранию. Плохо ремонтируется. Хороший прозрачный внешний вид.

Полипараксилилен («парилен»). Диапазон рабочих температур $-70...+150^{\circ}\text{C}$. Применяется там, где требуются исключительная сплошность и равномерная укрывистость покрытия. Будучи осажденными из паровой фазы, они покрывают все поверхности слоем постоянной толщины, в том числе тонкие зазоры, полости и «пазухи». Может использоваться в тонких пленках. Ремонту не поддается.

Гидрофобные покрытия. Используются водоотталкивающие свойства полиорганосилоксановых покрытий для влагозащиты печатного монтажа.

Нанесение лаков следует проводить в условиях сухого атмосферного воздуха (до 60 % влажности). Влага воздуха, захваченная сырым лаком, вызывает гидролиз полимера или, например, образование гидратов аминов, входящих в эпоксидную смолу. Это приводит к их выделению на поверхности в виде помутнений или белесоватости.

6.8. Тестирование

Наиболее простые установки визуального и видеоконтроля сличением изображений эталонов и рабочих образцов наиболее производительны и относительно недороги. Но они позволяют увидеть только ошибки установки компонентов. Тем не менее, они дают возможность увидеть и проанализировать дефекты, обнаруженные другими видами контроля, и принять окончательное решение для забракования или ремонта.

Автоматизация оптического контроля (AOI – автоматическая оптическая инспекция) значительно увеличивает производительность тестирования, позволяя встраиваться в жесткий временной график производства. Однако эти установки настолько дороги, что российским производителям они практически не доступны. Для нас целесообразнее иметь рабочие места, хорошо вооруженные оптическими системами визуального наблюдения. В отличие от широко распространенных российских бинокулярных микроскопов типа МБС-10 предлагаются аналогичные, но с флюоресцентной или волоконно-оптической подсветкой. Тринокулярные конструкции микроскопов (например, SCIENSCOPE) позволяют использовать для наблюдения и документирования видеокамеру. Хорошей репутации заслужили эндоскопы фирмы ERSA

При всей распространенности оптического контроля доминирующим видом тестирования в зарубежном производстве были и остаются системы внутрисхемного контроля (in-circuit test). Они позволяют обнаружить дефектные компоненты, измерить индуктивность и емкость в реальной схеме, найти КЗ и разрывы соединений, проверить полярность диодов, транзисторов, электролитических конденсаторов и т.д. Системы внутрисхемного контроля дают наиболее достоверные результаты, если при проектировании сгенерирована корректная программа, а на платах выполнены специальные контрольные

точки для присоединения зондов. Но при внутрисхемном контроле не всегда удается обеспечить хорошее тестовое покрытие: сказывается ограниченность в установке необходимого количества контактирующих с платой зондов. Количество зондов в адаптере не может превышать 6000. А для СВЧ-модулей вообще нет возможности сделать ответвления к контрольным точкам и тем более проверить модуль в его рабочих режимах СВЧ. Естественно, что альтернативой внутрисхемного контроля для таких электронных модулей (лучше сказать, дополнением) выступает рентгеновский контроль. Появились тестеры с «летающими» щупами с четырьмя или восьмью зондами. Их производительность удовлетворяет лишь опытные или мелкосерийные производства, но с их помощью можно обеспечить большее тестовое покрытие. Широко используются модули для тестирования в процессе движения продукта по конвейеру (in-line testing, test-in-line). Для этого контакты встраиваются в полеты. В полеты может быть встроен подогрев для тестирования на верхнем пределе температур.

При выборе тестирующих систем внутрисхемного контроля приходится учитывать ценовую ситуацию. Стоимость тестера, работающего с контактирующим устройством, составляет в среднем 200,0 тыс. долл., а контактирующее устройство на каждый тип модуля — более 25 тыс. Тестер с «летающими» щупами дороже (Flying Scorpion) — около 400,0 тыс. долл., но он универсален для любого типа модуля.

Установки рентгеновского контроля универсальны: они осуществляют послойное тестирование электронных модулей и печатных плат и позволяет обнаружить разрывы или ущербность соединений, дефекты паяк, которые для компонентов типа BGA другим способом не обнаружишь, дефекты на внутренних слоях МПП. Кроме того, в ряде систем используется блокировка радиации при перемещении образцов в камере для анализа их пространственного изображения. Как правило, манипулирование занимает львиную долю времени при тестировании образцов. Блокировка радиации при манипулировании позволяет в меньшей степени травмировать компоненты и материалы при X-Ray-тестировании.

6.9. Инженерное обеспечение производства

Для достижения высокого технического уровня сборочно-монтажного производства недостаточно укомплектовать его прецизионным оборудованием, обязательным становится дополнительное инженерное обеспечение условий производства — создание гермозон с контролируемой атмосферой по запыленности, температуре и влажности.

6.9.1. Одежда персонала

Весь вспомогательный персонал должен быть в одежде из антистатических материалов (белые халаты х/б, батист).

Персонал на фотолитографии — халаты и шапочки синтетические (не пылящие) с антистатической обработкой, не люминесцирующие, тапочки кожаные. Персонал на химии и гальванике — халаты и тапочки кислотоупорные, перчатки хирургические, косынки (шапочки).

Персонал на механическом участке — халаты, тапочки, шапочки (косынки) без специальных требований.

Склад — так же, как персонал на химии + бахилы или резиновые сапоги на время разлива (расфасовки) агрессивных жидкостей.

6.9.2. Очистка воздуха

Воздухораспределительные устройства в чистых помещениях служат для подачи фильтрованного воздуха и организации однородного воздушного потока. Скорость воздухообмена с точки зрения обеспыливания зависит от конфигурации помещения, оборудования и его расположения, его тепловыделений, от типа воздушного потока (ламинарный или турбулентный, вертикальный или горизонтальный), режима работы, используемых в производстве материалов. Кратность обмена воздуха определяется балансом пылевыхыделений и эффективности фильтрации. Источников пылевыхыделений в производстве печатных плат довольно много, чтобы их перечислять. Даже работающий персонал, изолированный защитной одеждой, является источником обильного выделения пыли различного калибра (рис. 6.38).

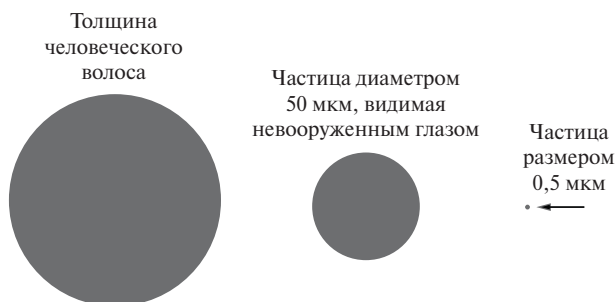


Рис. 6.38. Представления о частицах загрязнения чистых помещений

Рециркуляция воздуха проектируется так, чтобы не только очищать воздух фильтрами, но и потоками воздуха не поднимать пыль. Для этого вертикальный однонаправленный поток направляется вниз, проходит чистое помещение и перфорированный пол, затем идет вверх по вертикальным воздухопроводам и через потолочные фильтры возвращается в помещение (рис. 6.39). По пути он проходит через регулируемый воздухоохладитель или воздухонагреватель, паровые или ультразвуковые увлажнители.

Поддержание избыточного давления в чистых помещениях необходимо для защиты помещения от загрязнения со стороны прилегающих зон, защи-

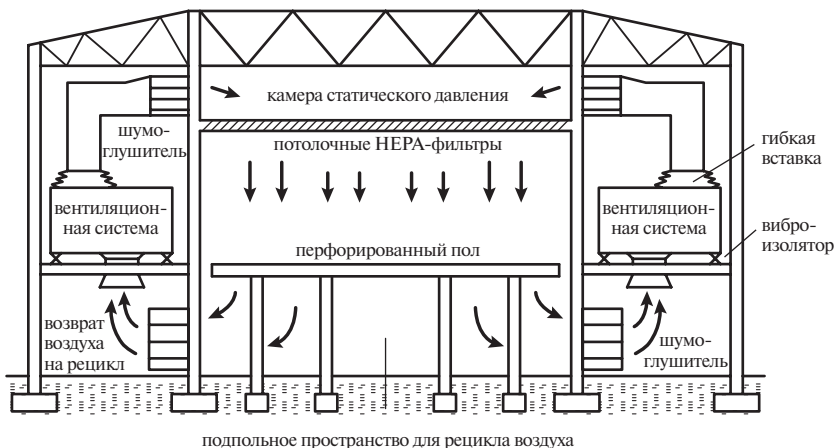


Рис. 6.39. Схема обмена воздуха в чистых помещениях

ты движущегося потока от нежелательных загрязнений, предотвращения перекрестного загрязнения между зонами, поддержания требуемых значений температуры и влажности. Чистое помещение для микроэлектроники обычно работает в диапазоне избыточных давлений относительно прилегающего ко-



Рис. 6.40. Фрагмент планировки чистых и вспомогательных помещений

ридора и других помещений здания поддерживается в диапазоне 40...60 Па с полугерметичным воздушным шлюзом на входе в чистую зону. Гардеробная помещения для переодевания часто выполняют роль подобных воздушных фильтров (рис. 6.40).

6.9.3. Термостабилизация

При назначении уровня стабильности температуры приходится считаться со стоимостью этого требования: стабильность $\pm 1^\circ\text{C}$ обходится в несколько раз дороже, чем $\pm 2^\circ\text{C}$. Это в первую очередь связано с тем, что термостабилизированное помещение чаще приходится охлаждать от тепловыделений энергетически мощного оборудования. Как правило, проектировщики чистых помещений строят, выгораживая производственные зоны так, чтобы уменьшить затраты на отделку капитальных стен, потолков и полов. Для этого они встраивают в периметр существующих помещений чистые комнаты со шлюзами и изолированным воздухообменом (рис. 6.41.).



Рис. 6.41. Пример встраивания чистых зон в строительные конструкции производственных помещений

6.9.4. Управление влажностью

Относительная влажность воздуха в ответственных зонах помещения контролируется соответствующими датчиками. При повышенной влажности понижают выходную температуру на охладителе воздуха для понижения влагосодержания (избыток влаги конденсируется на испарителях). Для компенсации понижения температуры потока воздуха теплообменник второго подогрева поддерживает требуемый температурный режим. Для повышения влажности воздушного потока включают ультразвуковые увлажнители, снабженные деионизованной водой с удельным сопротивлением порядка 1 МОм.

6.9.5. Вытяжная вентиляция

Обычно вытяжные системы подразделяются по типам удаляемых веществ на кислотные, органические, токсичные, тепловые и общеобменные. Для улавливания кислотных паров используют горизонтальный или вертикальный

скруббер. Выбросы растворителей и летучих веществ требуют обработки путем абсорбции, последующего выпаривания, концентрации и утилизации (сжигания) на месте. Токсичные выбросы обычно нейтрализуются путем высокотемпературной обработки непосредственно на месте их происхождения. Надлежащим образом организованная обработка воздуха может свести к минимуму количество выбросов в атмосферу.

6.9.6. Уровень шума и вибрации

Работающее оборудование является источником шума и вибрации. И то, и другое создает помехи в обеспечении точности позиционирования и совмещения. Работающие сверлильные станки, у которых шпиндели перемещаются вверх-вниз со скоростью до трех ударов в секунду, могут мешать друг другу и другому прецизионному оборудованию, если отсутствует виброизоляция.

Слоистые («вафельные») бетонные полы хорошо предотвращают передачу вибраций. Но и на таких полах необходимо виброизолировать «шумящее» оборудование с помощью пружин и рессор, гибких соединений или изолированных фундаментов.

Городские постройки часто грешат наличием низкочастотной вибрации от огибающих здание ветровых потоков, движения транспорта (хуже всего метро), движения воздушных потоков по коробам внутренней вентиляционной системы. Избавиться от низкочастотной вибрации очень трудно, низкочастотные шумы проникают через большинство типов звукоизоляции.

6.9.7. Магнитные и электромагнитные поля

Величина магнитного поля Земли у поверхности составляет 0,5 Гс. Безопасный уровень магнитного поля для жизни и здоровья человека составляет 5 Гс. Особенно чувствительны к магнитным полям электронные системы управления оборудованием, измерительные приборы. Для участков тестирования и лабораторного анализа, метрологических лабораторий магнитное излучение должно быть на уровне 0,05 Гс и ниже. Источником магнитного излучения могут служить силовые кабели, индукторы, трансформаторы и т.п. При проектировании производственных помещений приходится это учитывать.

6.9.8. Электростатический заряд в воздухе и на поверхности

Статическое электричество возникает при разделении поверхностей, или как трибоэлектричество, или сродство частиц пыли к тому или другому электрическому заряду, который они приобретают самопроизвольно. Если образовавшийся на поверхности заряд не имеет возможности быстро стекать, он накапливается на поверхности материала и называется «электростатическим».

Аккумулированный электростатический заряд является источником проблем на большинстве операций технологических процессов производс-

тва электроники. Он может стать причиной воспламенения паров растворителей, вызывать слипание тонких слоев материалов и пленок, накапливать на поверхности пыль и мелкие частицы из воздуха (особенно чувствительны к этому литографические процессы), вызывать повреждение или даже разрушение тонких полупроводниковых структур электронных компонентов, вносить сбои в работу микроэлектронного оборудования.

Обычно минимальная энергия возгорания для смеси воздуха и углеводородов (в частности, паров растворителей) составляет 0,2 мДж при электростатическом разряде в несколько киловольт

Инженерное обеспечение современного производства электроники — неперенный атрибут, гарантирующий воспроизводство высоких норм проектирования, надежности аппаратуры и низкий уровень брака.

Приходится считаться с тем, что вложения в развитие основного производства соизмеримы с объемами затрат на инженерное обеспечение этого производства. Но без этого трудно гарантировать надежность производимых продуктов и уверенно высокий выход годной продукции.

6.10. Сертификация сборочно-монтажного производства по ИСО 9000

6.10.1. Общие положения

Сертификация системы качества — добровольная акция предприятий-изготовителей, позволяющая им получить преимущество на рынке продуктов перед конкурентами, установить повышенные цены на свои продукты за счет гарантий качества.

Для предприятий, рассчитывающих получить государственный заказ, соблюдение требований ИСО 9000 является необходимым условием (Постановление Правительства РФ № 113 от 02.02.98). А если предприятие оформляет лицензию на право производства, то неперенным атрибутом является сертификат качества. И единственным в России документом, оговаривающим требования к системе качества, являются ИСО 9000 — серия стандартов и рекомендаций по их выбору, внедрению и осуществлению проверок (аудитов) действующей на предприятии системы обеспечения качества производства.

Иерархия основополагающих стандартов, на соответствие которым проходит сертификация: ГОСТ Р ИСО 9001 охватывает все этапы жизненного цикла продукции от разработки до технического обслуживания ее в условиях эксплуатации и является наиболее полным сводом требований к системам качества, ГОСТ Р 9003 ограничивается аттестацией продукта, как результата проектирования и производства через проведение испытаний, ГОСТ Р 9002 формулирует требования к организации системы качества в производстве. Иерархия этой

группы стандартов подобна матрешкам, среди которых ГОСТ Р 9001 самая большая, в ней сидит ГОСТ Р 9002, и внутри последней ГОСТ Р 9003.

Казалось бы, что на первом этапе для сертификации целесообразно выбрать наиболее простую модель по ИСО 9003. Но наиболее престижной считается модель по ИСО 9001, охватывающая все стадии жизненного цикла продукции. Модель системы качества, определенная ИСО 9002, используется в том случае, когда предприятие не является разработчиком, и обеспечение ее качества осуществляется при производстве и монтаже продукции. Модель системы качества по ИСО 9003 применяется очень редко, когда обеспечение соответствия продукции определенным требованиям может быть только в процессе контроля и испытаний, и при оформлении лицензии на право производства или получении госзаказа она не принимается всерьез.

Тем не менее, даже при наличии системы качества по ИСО 9001 ее нельзя распространить на все виды продукции, поскольку при заключении контракта на производство потребителя интересует только обеспечение качества на приобретаемую им продукцию. Т.е. в этой ситуации возникает обязательность индивидуальной аттестации продукта производства по ИСО 9003.

Процедуре сертификации предшествует создание системы обеспечения качества, которая хорошо знакома предприятиям оборонного комплекса.

6.10.2. Входной контроль материалов и комплектующих

Очень важно выбрать тех поставщиков, которые сертифицированы по системе качества, т.е. поставляют сертифицированные материалы и продукты. Тогда можно ограничить число проверяемых параметров или, удостоверившись в эффективности системы качества поставщиков, вообще отказаться от входного контроля материалов от этих поставщиков, положившись на их гарантии качества. Во всяком случае, приобретая дешевый несертифицированный материал или комплектующие, производитель вынужден организовывать у себя входной контроль и для этого приобретать и метрологически поддерживать дорогостоящее тестовое оборудование, тратить деньги и время на процедуры контроля.

6.10.3. Технологическая документация

При всех альтернативах в выборе технологий предпочтение отдается тем, которые поддаются максимальной формализации, так чтобы технологическая документация (ТД) читалась однозначно и воспроизводилась любым обученным специалистом одинаково. Все замеченные разночтения должны немедленно устраняться. Если технология разработана с использованием нормативных технических документов (ГОСТ, ОСТ, РД), должны прослеживаться изменения в НТД. Технологическая документация — архивный документ строгой



отчетности. Если в технологию вносятся изменения по инициативе предприятия (не НТД), эффективность их должна подтверждаться испытаниями. По результатам положительных испытаний во все архивные экземпляры ТД вносятся изменения с регистрацией их реквизитов. После достаточной апробации изменений в ТД целесообразно направить предложения в адрес авторов соответствующей НТД. Иначе аудитом будет найдено несоответствие технологической документации НТД.

6.10.4. Контрольные операции

Современная российская нормативная документация богата стандартами, оговаривающими требования к выполнению технологических процессов. Например, ОСТ 107.460092.028-96. «ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ. Технические требования к технологии изготовления». Производственный контроль, как правило, охватывает весь объем предусмотренных ТД проверок. Контроль ОТК уменьшен по объему. Для контроля специализированными службами выделяются операции, наиболее значимые в обеспечении качества. Объем контроля, выполняемый ОТК и специализированными службами, оговаривается отдельным согласованным документом.

Контрольным операциям и испытаниям продукт производства подвергается по всему циклу изготовления. Контроль только готового продукта, по результатам которого устанавливают лишь процент брака, не может существенно повлиять на формирование или изменение качества товара. Именно поэтому контроль качества должен осуществляться на каждой технологической операции или на критических операциях. Дефекты нужно обнаруживать как можно раньше. Организация производственного процесса наиболее эффективна, если все виды контроля и испытаний материалов, узлов, готовых изделий оговорены в технологической документации с указанием средств контроля и измерений, испытательного оборудования, соответствующие методики испытаний и измерений, критерии качества (браковочные признаки).

6.10.5. Метрологическое обеспечение

Часто в контрольных операциях, связанных с измерениями, не учитываются метрологические погрешности при установлении допуска на контролируемый параметр. Последствия этого очевидны: можно забраковать годное изделие и наоборот. Обычно такие конфликты происходят между производственным контролем и ОТК. В мировой практике находят два варианта выхода из таких конфликтов. Один из них состоит в преднамеренном загроблении последующей стадии контроля (ОТК) относительно предыдущей (производственный контроль). По другому варианту допускается незначительный объем выявления отклонений на последующей стадии контроля. В России загробление контроля на каждой последующей стадии проверок не практикуется. Поэтому приходится сужать допуски с учетом метрологических погрешностей. При

этом риск пропуска брака исключается, но часть годной продукции будет забракована. Выход только в повышении точности измерений и четкости методологии контроля.

Часто игнорируют известный всем факт, что точность измерений зависит не только от правильности выбора средств измерений, но и от состояния окружающей среды и производственных помещений. В помещениях, в которых производятся ответственные измерения и контрольные операции (например, контроль правильности монтажа печатных плат) должны быть установлены приборы для контроля состояния окружающей среды, показания которых регулярно регистрируются и заносятся в журнал ответственными лицами. При нарушении условий окружающей среды, вызывающих ухудшение качества контроля и испытаний, процедуры проверок приостанавливаются до приведения условий в норму.

6.10.6. Идентификация продукта

Конструкторская и технологическая документация должны устанавливать место и порядок идентификации продукта в процессе производства путем простановки клейм, прикреплением бирок на продукцию с указанием обозначения изделия, даты его изготовления, номера партии, отметкой контролера о его приемке и других данных, необходимых для поиска продуктов, если их вдруг по какому-то браковочному признаку необходимо изъять из производства или снять с эксплуатации. Прослеживаемость продукции осуществляется также оформлением технологических паспортов, маршрутных карт и другой документации, в которой регистрируются результаты технологических и контрольных операций, указываются обнаруженные дефекты и принятые меры по их устранению. В этом случае повышается ответственность исполнителей и поступление продукции, имеющей дефект, на последующие операции маловероятно.

6.10.7. Система качества

Система обеспечения качества на предприятии должна устанавливать требования по учету использования продукции, материалов, полуфабрикатов на основе товарно-сопроводительных документов. Это необходимо, чтобы определить, в каких готовых изделиях применены комплектующие и материалы, запущенные в производство с отступлениями от установленных требований или имеющие скрытые дефекты, обнаруженные по результатам периодических испытаний или на этапе эксплуатации. Эта система учета трудоемка, но оправдана, если выпуск недоброкачественной продукции обернется серьезными издержками. Введение штрих-кодовой идентификации продуктов намного облегчает документооборот и заодно позволяет автоматизировать процессы регистрации прохождения продукта в производстве.



6.10.8. Аттестация технологического оборудования и оснастки

Стабильность качества в первую очередь обеспечивается правильным использованием производственного, испытательного оборудования, технологической оснастки, средств контроля и измерений. Излишне говорить о необходимости регламентированной поверки средств измерений и контроля. Но о необходимости периодической аттестации оборудования и оснастки говорить приходится. Главный аспект состоит не в том, чтобы обнаружить выход каких-либо параметров оборудования за установленные пределы, а в своевременном предупреждении этого выхода. Чаще всего это связано со своевременным обнаружением систематической составляющей погрешности оборудования (например, точности позиционирования инструмента) и корректирующих действиях по ее устранению. Ясно, что все эти действия должны регистрироваться в аппаратном журнале и скрепляться подписями ответственных лиц.

6.10.9. Аттестация персонала

Эта малопривлекательная процедура обеспечения качества не должна быть похожей на экзамен, поскольку она направлена не столько на проверку знаний аттестуемого, сколько на выявление факторов улучшения качества. Если с работником разговаривать доверительно, можно на процедуре аттестации узнать об эффективности системы качества больше, чем в курилке. Создание системы качества, прежде всего, начинается с доведения ее до персонала всех уровней. На каждом организационном уровне предприятия политика в области качества должна найти отражение в виде конкретных функций и ответственности персонала, закрепленных в положениях о службах и подразделениях, должностных инструкциях. Особенно эффективна так называемая «матрица ответственности», устанавливающая степень участия и ответственности каждого структурного подразделения и формы их взаимодействия при выполнении закрепленных за ними задач. Аттестация персонала — повод для отработки этой системы.

6.10.10. Анализ дефектов и отказов

Для осуществления этой очень важной функции на предприятии создается постоянно действующая комиссия из числа независимых экспертов, способных выработать план обнаружения причин дефектов или отказов с привлечением средств физико-химического анализа, провести анализ полученной информации и установить достоверную причинно-следственную связь дефектов или отказов с состоянием производства. Ответственность решения этой комиссии усугубляется еще и тем, что она часто ограничена временными рамками, так как во время ее работы производство стоит или работает на брак. Очень важно иметь хорошую аналитическую вооруженность центральной заводской лаборатории, так как правильность решений зависит от достоверности и полноты информации.

6.10.11. Контроль функционирования системы качества

Функционирование и совершенствование системы качества невозможны без проведения внутренних проверок, осуществляемых специально подготовленными специалистами. Внутренние проверки системы качества предприятия являются обязательным элементом в любой модели системы качества. Активная работа в этом направлении возможна только при наличии подготовленного персонала. Обучение специально подобранной группы будущих экспертов может быть организовано с привлечением преподавателей, имеющих право на такую деятельность и выдачу соответствующих документов. В обязанности этой группы входят разработка, внедрение и постоянное совершенствование системы качества, обработка данных о качестве. По существу внутренние проверки тестируют систему качества, дают повод для ее корректировки.

Особое внимание необходимо уделять документированию процедур и их выполнению, так как этот элемент является ключевым звеном в функционировании всей системы. И при проведении аудита к нему проявляют повышенное внимание.

6.10.12. Испытания продуктов

Нормативная документация, устанавливающая общие требования к испытаниям электронных модулей (электронных узлов), в России отсутствует. Поэтому основой для испытаний электронных модулей служат или проектные задания, или технические условия. Как правило, в набор результатов испытаний электронных модулей входят протоколы:

- Проверка комплектности
- Проверка соответствия комплекту конструкторской документации
- Проверка маркировки
- Проверка упаковки и маркировки упаковки
- Проверка комплектности, достаточности, качества конструкторской документации, порядка ее согласования
- Проверка выполнения конструктивных требований
- Проверка комплектности и качества эксплуатационной документации
- Проверка габаритных размеров
- Проверка массы
- Проверка выполнения общих требований
- Проверка на соответствие требованиям к техническим характеристикам модуля
- Проверка электропитания модуля
- Проверка потребляемой мощности
- Проверка на непрерывную работу
- Проверка на устойчивость к воздействию синусоидальной вибрации
- Проверка на устойчивость к воздействию акустического шума

- Проверка на устойчивость к воздействию механического удара одиночного действия
- Проверка на воздействие пониженного атмосферного давления
- Проверка на воздействие повышенной температуры окружающей среды

Целью сертификационных испытаний (СИ) является проверка соответствия разработанных и изготовленных образцов электронного модуля требованиям технических условий или проектному заданию.

Задачами СИ являются:

- проверка полноты и достаточности отработки конструкторской документации;
- проверка достаточности состава и качества средств контроля;
- проверка полноты и достаточности отработки эксплуатационной документации;
- проверка отработанности технологической документации для изготовления и контроля модуля;

На СИ представляются следующие документы:

- приказ о назначении комиссии по проведению СИ;
- перечень средств измерений и специального оборудования, используемых для проведения испытаний и проверок;
- перечень НТД, необходимой для проведения испытаний (на которые есть ссылки в методиках испытаний);
- комплект КД (в том числе эксплуатационной) на модуль;
- технические условия;
- программа сертификационных испытаний модуля;
- методики сертификационных испытаний;
- протоколы квалификационных испытаний;
- уведомление (извещение) о готовности модуля к сертификационным испытаниям, оформленное в соответствии с требованиями НТД;
- согласованный и утвержденный график проведения СИ;
- расчет показателей надежности модуля;
- руководство по эксплуатации и этикетка модуля.

По результатам сертификационных испытаний оформляется отчет, в котором делаются выводы о возможности сертификации продукта, выявленные несоответствия, их оценка для сертификации, необходимость доработки и т.д.

6.10.13. Процедуры сертификации

Сертификацию проводят в три этапа.

Первый этап. Предварительная подготовка к сертификации. Предприятие разрабатывает рабочий план, по которому самостоятельно создает или подготавливает свою систему качества, руководствуясь следующими документами:

ГОСТ Р 40.001 «Правила по проведению сертификации систем качества в Российской Федерации»;

«Порядок проведения сертификации продукции в Российской Федерации» от 21.09.94 с изменением №1 от 25.06.96.

В соответствии с Примечанием к разделу 2 «Правил по проведению сертификации в Российской Федерации» от 16.02.94 к нормативным документам, используемым при обязательной сертификации относятся:

- Законы Российской Федерации;
- Государственные стандарты, в том числе принятые в Российской Федерации межгосударственные и международные стандарты;
- Санитарные правила и нормы;
- Строительные нормы и правила;
- Нормы по безопасности;
- Документы, устанавливающие обязательные требования к продукции.

В качестве схемы для системы обеспечения качества по ИСО 9002 можно принять изложенное выше с обязательным оформлением управляющих документов, положений о службах, должностных инструкций, методологии, оперативные инструкции, архивная технологическая документация и т.д.

Второй этап. Подготовка к сертификации. Предприятие привлекает консалтинговую компанию, специализирующуюся на оформлении всей документации для сертификации производства. За рубежом такие компании независимы от сертифицирующих органов. В России они, как правило, приближены к Госстандарту. Поэтому их привлечение создает гарантии успешного проведения заключительного этапа сертификации.

Третий этап. Проведение заключительного сертификационного аудита. Сертифицирующими органами являются структуры Госстандарта. Сегодня многие государственные ведомства или окологосударственные структуры стали создавать свои собственные органы сертификации, в который предприятие должно пройти аудит системы качества.

Работы по сертификации состоят из проведения предварительного регистрационного аудита с выявлением несоответствий, заключительного аудита, оформления сертификационных документов, ежегодного надзора.

Выбор органа сертификации предприятие осуществляет по многим критериям, исходя из рынка, на котором оно работает, географии. Сертифицирующие организации проводят только окончательный аудит, определяющий соответствие системы управления качеством требованиям стандартов ИСО 9000. В случае положительного результата аудита предприятие имеет право ставить на своей продукции и рекламных материалах логотип соответствующего органа сертификации и только этот символ. Всяческие надписи типа «Продукт сертифицирован в соответствии со стандартом ИСО 9000» и им подобные являются незаконными с точки зрения Международной организации стандартизации.



Необходимо отметить, что процесс подготовки предприятия и окончательная сертификация занимают, как правило, 1...2 года. После получения сертификата компания обязана раз в 3 года подтверждать свое право на соответствие ИСО 9000, т.е. проходить так называемую пересертификацию (аудит со стороны сертифицирующего органа).

6.11. Заключение

Постоянное обновление элементной базы требует соответствующей модернизации существующих технологий и оборудования сборочно-монтажного производства.

Для России после 90-х годов стала неизбежной интеграция с западным рынком и его довлеющее влияние на отечественное производство. Это привело к необходимости активного заимствования технических решений, состоявшихся в международной кооперации электронной продукции.

Литература

1. Нинг-Ченг-Ли. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP Flip-Chip технологии. — М.: Издательский Дом «Технологии», 2006 г.

Заявки на книги присылайте по адресу:
125319 Москва, а/я 594
Издательство «Техносфера»
e-mail: knigi@technosphaera.ru
sales@technosphaera.ru
факс: (495) 956 33 46

В заявке обязательно указывайте
свой почтовый адрес!

Подробная информация о книгах на сайте
<http://www.technosphaera.ru>

Медведев Аркадий Максимович

Сборка и монтаж электронных устройств

Компьютерная верстка — А.В. Бурага
Технический редактор — А.И. Акулин
Корректоры — О.А. Ильинская, А.М. Кириленко
Дизайн книжных серий — С.Ю. Биричев
Выпускающий редактор — М.В. Капранова
Ответственный за выпуск — О.А. Казанцева

Формат 60х90/16. Печать офсетная.
Гарнитура Ньютон
Печ.л. 16. Тираж 3000 экз. Зак. №
Бумага офсет №1, плотность 65г/м²

Издательство «Техносфера»
Москва, Лубянский проезд, дом 27/1

Диапозитивы изготовлены ООО «Европолиграфик»

Отпечатано в ОАО «Чебоксарская типография №1»,
428019 г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15